Diplomarbeit

Savoniusrotor mit



Maximum Power Point Tracker

Ausgeführt an der Höheren Technischen Bundeslehranstalt Wien 3 Rennweg

Abteilung für Mechatronik

durch

Daniel Grohs

Koloman Klimpfinger (PL)

Harald Lerch

Patrick Redl

unter der Leitung von

DI Martin Meschik

DI Karl Allabauer

Wien, Mai 2006

Eidesstattliche Erklärung

Wir erklären an Eides statt, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst haben.

Andere als die angegebenen Quellen wurden nicht benützt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen haben wir als solche kenntlich gemacht.

Wien am 19. Mai 2006

Daniel Grohs ______________________________

Koloman Klimpfinger (PL) ______________________________

Harald Lerch ______________________________

Patrick Redl ______________________________

Kurzfassung

Grundidee der Diplomarbeit war die optimale Nutzung eines Savoniusrotors als alternative Energiequelle zum Laden eines Akkumulators über einen Maximum Power Point Tracker (MPPT).

Der Savoniusrotor besteht aus zwei S-förmig angeordneten Rohrhälften, die um 20% - 30% zueinander versetzt sind. Um den Rotor windrichtungsunabhängiger und leistungsfähiger zu machen, wird ein weiteres Rotorpaar, um 90° verdreht, darüber angebracht. Mit der aus dem Wind gewonnenen Energie treibt der Rotor einen Gleichstromgenerator an, um elektrischen Strom zu erzeugen.

Der Maximum Power Point Tracker besteht aus einem Step-Up Converter und einem Mikrokontroller, der diesen überwacht und regelt. Der Step-Up Converter wandelt die nicht konstante geringe Eingangsspannung auf einen höheren Ausgangswert, um einen 24 Volt Blei-Akkumulator zu laden. Der Mikrokontroller misst mit seiner Sensorperipherie die Ein- und Ausgangsströme und Spannungen, um die in den Akku geladene Leistung zu bestimmen und durch den Vergleich mit dem vorherigen Wert den Schaltvorgang im Step-Up Converter und damit die Belastung des Savoniusrotors passend zur Windstärke zu optimieren.

Abstract

The basic idea of this thesis was to find the best possible way of using a Savonius-rotor as an alternative energy resource for charging an accumulator by means of a Maximum Power Point Tracker (MPPT).

The Savonius-rotor consists of two halves of a pipe, 20% shifted and arranged in an S-shaped way. To make the rotor more independent of the wind direction and more powerful, a further rotor pair, rotated 90 degrees, is attached on top of the first. With the energy produced by the wind, the rotor impels a direct current generator that produces electricity.

The Maximum Power Point Tracker consists of a step-up-converter which is controlled by a microcontroller. The step-up-converter converts the non-continuous low level input voltage into a higher level output voltage to charge a 24 Volt lead-gel-accumulator. By means of its sensor periphery, the microcontroller measures the input and output currents and voltages to identify the capacity that is charged into the accumulator. By comparing this value with the capacity's earlier value, the microcontroller optimises the step-up-converter's switching operation and in this way also the Savonius-rotor's load in relation to the wind strength.

Danksagung

Die Arbeit an unserem Maturaprojekt „Savoniusrotor mit Maximum Power Point Tracker“ war sehr zeitaufwendig, daher mussten wir uns intensiv mit dem Thema auseinandersetzten. Ohne tatkräftige Unterstützung, durch unsere Sponsoren und unsere betreuenden Lehrer, wäre allerdings die Fertigstellung des Projekts nicht möglich gewesen. Allen voran gilt unser Dank unserem Hauptsponsor „Förderanlagen – Schlosserei WERFRING Ges.m.b.H.“, welcher die kompletten Produktions- und Materialkosten für den Savoniusrotor übernommen hat. Für den Entwurf und die Konstruktion der Windkraftanlage konnten wir uns Ratschläge bei der Firma einholen. Weiters wurden wir während der Fertigung im Betrieb von Fachkräften aus allen Fertigungsbereichen beraten und intensiv unterstützt. „Römerquelle“ stellte uns Material für das Rotormodell zur Verfügung und übernahm einen Teil der Kosten.

Die Firmen Conrad und RS-Components sponserten uns die meisten der benötigten Bauteile für die Elektronik.

In der Schule wurden wir stets von unseren Betreuern DI Martin Meschik und DI Karl Allabauer beraten. Die Unterstützung war vor allem für den Entwurf und die Kontrolle der Elektronik, beziehungsweise für die Berechnung der mechanischen Komponenten wichtig. Besonderer Dank gilt DI Roland Glas, der uns jederzeit Tipps zur Motorauswahl und den Tests mit dem Savoniusrotor lieferte. Die Fertigung der Leiterplatte wurde mit Hilfe von Fachlehrer Johannes Stehlik und Fachlehrer Martin Sommer durchgeführt.

Mit passender Fachliteratur wurden wir von DI Roland Glas und DI Martin Meschik versorgt, außerdem durften wir eine Kopie der Hausarbeit über „Messung der technischen Daten von Vertikalachsen-Windrotoren“ von Henry Grootmaack verwenden. Abschließend wurde der Ausdruck der Diplomarbeit dankbarer Weise von „AV + Astoria Druckzentrum GmbH“ übernommen. Besonderer Dank gilt Silvia Redl, die unser Team während der Planungs- und Testphase in Edelstal immer gerne mit Speis- und Trank versorgt hat.

Zum Schluss bedanken wir uns, das Team Savonius, noch bei allen Kollegen und Helfern, die nicht namentlich erwähnt wurden, aber wesentlich zu unserer Arbeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

Beilage: 1 CD

Datei-Info:

Dateiname:	Diplomarbeit_Savonius_MPPT.doc
Speicherdatum:	18. Mai 2006
Druckdatum:	18. Mai 2006
Seitenanzahl:	241
Pfad:	C:\Diplomarbeit_Savonius_MPPT.doc

Einleitung

1.1. Idee

Grundidee der Diplomarbeit ist die optimale Nutzung eines Savoniusrotors als alternative Energiequelle zum Laden eines Akkumulators über einen Maximum Power Point Tracker (MPPT). Ein Savoniusrotor eignet sich ideal zur dezentralen Energieversorgung von kleinen Haushalten oder Betrieben. Zum Beispiel könnte der Savoniusrotor in Ländern der Dritten Welt aufgestellt werden, um Werkstätten oder Arztpraxen mit elektrischer Energie zu versorgen. Aber auch in gebirgigen Gebieten, in denen Stromverbindungen nur schwer verlegt werden können, wäre der Savoniusrotor äußerst praktisch.

Um die maximale Leistung des Aufbaus über einen geeigneten Spannungswandler an den Verbraucher zu übertragen, wird ein Maximum Power Point Tracker (MPPT) verwendet. Dieser regelt die Pulsweite des Step-Up Converters so, dass der Savoniusrotor immer am Maximum Power Point betrieben wird.

1.2. Motivation

Die aktuelle prekäre Lage in der Treibstoffpolitik treibt auch die Strompreise in die Höhe. Die CO_2 Emissionen nehmen ständig zu und verursachen verheerende Katastrophen. Es besteht ganz klar Handlungsbedarf. Da wir selbst über den derzeitigen Trend zur Zerstörung der Umwelt besorgt sind und auch in 20 Jahren noch frische Luft atmen wollen, ist es uns ein großes Anliegen eine Energiegewinnungsanlage im Einklang mit der Natur zu entwickeln. Schon früh in der Geschichte der Menschheit nutzte man die Kraft des Windes aus, doch um konkurrenzfähig zu den anderen oftmals fossilen Energieträgern zu bleiben, muss die Leistung optimal genutzt werden. Mit diesem Ziel vor Augen versuchten wir ein Gerät zu konstruieren, das auch in dezentral gelegenen Gebieten errichtet werden kann und Strom liefert, indem die Windenergie, dank einer intelligenten Steuerung, optimal ausgenutzt wird. So waren wir sicher, mit dem Abschluss unserer Diplomarbeit nicht nur etwas zur Beendigung unserer Ausbildung beizutragen, sondern auch etwas für unsere, auch weiterhin lebenswerte und intakte Umwelt getan zu haben.

1.3. Ziele

Mussziele: Eines der Mussziele ist, den Rotor zu optimieren. Dazu soll ein Modell entworfen werden und im Windkanal getestet werden. Am Modell wird die optimale Rotorform und -stellung ermittelt. Ein weiterer Bestandteil der Diplomarbeit ist der Maximum Power Point Tracker, dieser muss entworfen und dimensioniert werden, um die maximal mögliche Leistung in einen Akkumulator zu speisen.

Sollziele: Wenn möglich soll der Aufbau so entwickelt werden, dass er leicht transportiert werden kann. Außerdem sollte der Rotor möglichst leise laufen. (verbesserte Lagerung)

Kannziele: Weiters könnte eine Schaltungserweiterung eingebaut werden die es ermöglicht zwischen verschiedenen Spannungen umzuschalten um verschiedene Akkus zu laden. Außerdem wäre als weiteres Feature der Einbau einer Akkuladestandsanzeige denkbar. Abschließend bestünde die Möglichkeit auch die Einspeisung in ein Stromnetz durchzuführen.

Nichtziele: Nichtziel ist es die Anlage für Gewerbliche- oder Industriebetriebe zu dimensionieren.

2. Der Savoniusrotor

2.1. Grundlagen[1]

Der Savoniusrotor wurde 1925 vom finnischen Schiffsoffizier Siguard J. Savonius erfunden. Zunächst diente er zur Belüftung von Fracht- und Personenräumen, wurde jedoch bald zur Energieerzeugung verwendet. So werden mit ihm Pumpen, Kompressoren und Generatoren betrieben. Der einfache Aufbau kann aus leicht erhältlichen Altmaterialien, wie Ölfässern und Kfz-Teilen, realisiert werden.

Der große Vorteil von Savoniusrotoren gegenüber Horizontalachsenrotoren ist seine Windunabhängigkeit. So muss keine Energie für das Ausrichten mit der Windrichtung verwendet werden. Weiters kann er ein großes Windstärkenspektrum ausnützen und wird auch bei hohen Windgeschwindigkeiten betrieben. Außerdem überzeugt der Savoniusrotor durch seine hohe Sturmsicherheit bei richtiger Bauweise. Sie sind auch sehr unempfindlich gegen Wirbel und Turbulenzen.

Gegenüber anderen Windkraftanlagen, die einen Leistungsbeiwert von bis zu 59 Prozent haben, hat der Savoniusrotor mit maximal 20 Prozent einen geringeren Wirkungsgrad. Die geringe Schnelllaufzahl führt dazu, dass beim Antreiben eines Generators eine Übersetzung verwendet werden muss.

2.2. Aufbau[1]

Beim Bau eines Savoniusrotors sind einige Vorgaben aus der Fachliteratur gegeben.

So soll die Gesamthöhe des Rotors dem doppelten Durchmesser entsprechen. Der Versatz der beiden S-förmig angeordneten Rotorschaufeln beträgt 20-30 Prozent, um einen Teil des Windes von der windaktiven Schaufel auf die passive Schaufel umzuleiten. Um den Rotor windrichtungsunabhängiger und leistungsfähiger zu machen, wird ein weiteres Rotorpaar, um 90° verdreh t, darüber angebracht. Ein drittes Rotorpaar würde die Leistung nur gering steigern. Die einzelnen Stufen werden durch Teller getrennt. Zwischen Rotor und Gestell muss ein Abstand von mindestens 500 mm vorhanden sein, um das, mit dem Rotor mitrotierende Luftfeld, nicht zu stören.

Die Kraftabgabe an eine vertikale Welle, welche bis in Bodennähe geführt werden kann, ermöglicht es, wahlweise verschiedene Arbeitsmaschinen anzutreiben. So

[1] [vgl. SCH2002 S.5ff]

könnte bei schwachem Wind eine Wasserpumpe angetrieben werden und bei starkem Wind elektrische Energie gewonnen werden.

Diese Vorgaben wurden von den Autoren experimentell ermittelt, erforscht und von uns übernommen. Auch für Wandstärken und Material gibt es in der Fachliteratur einige Vorschläge, welche teilweise in die Konstruktion eingeflossen sind.

2.3. Theorie

Die aerodynamische Auslegung von Savoniusrotoren verlangt mehr als die Kenntnis elementarer physikalischer Gesetzmäßigkeiten der Energiewandlung. Dem Konstrukteur stellt sich ein großes Problem. Er muss den richtigen Zusammenhang zwischen der konkreten Formgebung des Rotors, der Anzahl der Rotorstufen und der aerodynamischen Eigenschaften finden.

Die Berechnungsmodelle zur aerodynamischen Auslegung von Savoniusrotoren zu beschreiben, würde den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen. Daher wurde der Savoniusrotor so dimensioniert, wie es in der Literatur zu finden ist. Trotzdem wird auf das Wesentliche eingegangen und genauer beschrieben.

2.3.1 Die elementare Impulstheorie nach Betz[2]

Die kinetische Energie einer Luftmasse lässt sich mit der folgenden Gleichung ausdrücken:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Wird eine bestimmte Querschnittfläche A betrachtet, welche von der Luft mit der Windgeschwindigkeit v durchgeströmt wird, so ist das durchfließende Volumen der Volumsstrom $\dot{V}$.

$$\dot{V} = v \cdot A$$

bzw. der Massestrom mit der Luftdichte ρ.

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$$

[2] [vgl. HAUE2003 S.79ff]

Setzt man den Massestrom in die Formel der kinetischen Energie ein, erhält man die Energiemenge pro Zeit, die durch einen Querschnitt fließt. Diese entspricht der Leistung:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A$$

Es gilt die mechanische Leistung, die der Savoniusrotor dem Windstrom entzieht, zu bestimmen. Da der Entzug der mechanischen Leistung auf Kosten der kinetischen Energie geht, muss die Geschwindigkeit nach dem Rotor geringer sein als vor dem Rotor. Es muss also bei gleichem Massestrom auch gleichzeitig eine Erweiterung des Querschnitts des Windstroms erfolgen. Dieses Prinzip wird in Abbildung 1 erläutert.

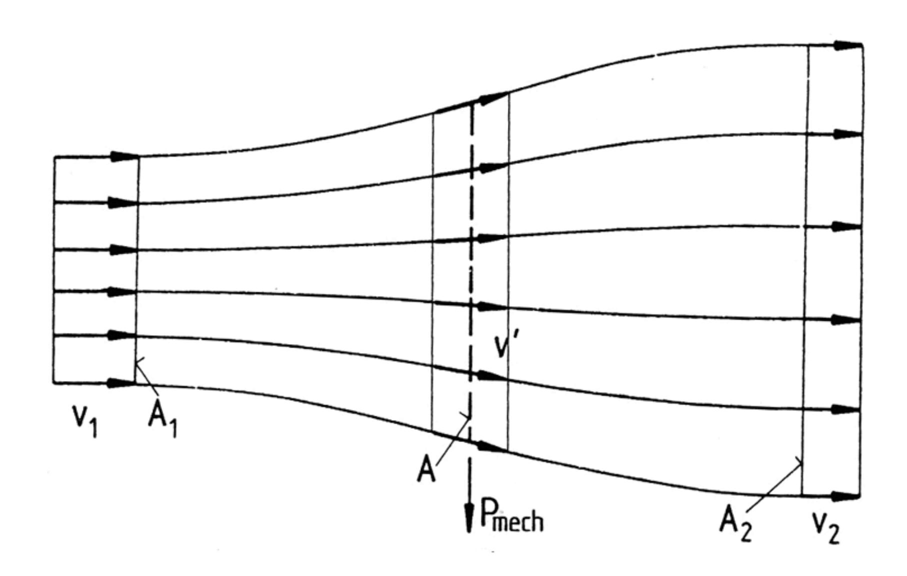


Abb. 1 Strömungsverhältnisse beim Entzug von mechanischer Leistung

Die mechanische Leistung, die der Savoniusrotor dem Luftstrom entzieht ergibt sich aus der Differenz von der Leistung vor und der Leistung nach dem Rotor:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot {v_1}^3 \cdot A_1 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot {v_2}^3 \cdot A_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot ({v_1}^3 \cdot A_1 + {v_2}^3 \cdot A_2)$$

Mit der Kontinuitätsgleichung ($\rho \cdot {v_1}^3 \cdot A_1 = \rho \cdot {v_2}^3 \cdot A_2$) ergibt sich weiter:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot ({v_1}^2 - {v_2}^2)$$

Die Kraft die der Wind auf den Savoniusrotor ausübt ist

$$F = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2)$$

Setzt man in die Gleichung P = F·v ein, erhält man für den Massenstrom

$$\dot{m} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2)$$

Das ergibt wiederum für die Leistung

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1{}^2 - v_2{}^2)$$

Um den Leistungsbeiwert c_p zu ermitteln, muss zunächst die Leistung des Luftstroms ermittelt werden, wenn der Savoniusrotor dem Wind keine Leistung entzieht. Diese Leistung ist:

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1{}^3 \cdot A$$

$$c_P = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1{}^2 - v_2{}^2)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1{}^3 \cdot A}$$

Der Leistungsbeiwert c_p ist nur noch von den Windstärken vor und nach dem Rotor abhängig. Ist $v_2 : v_1 = 1:3$ ist der ideale Leistungsbeiwert erreicht. c_p ist hier 0,593.

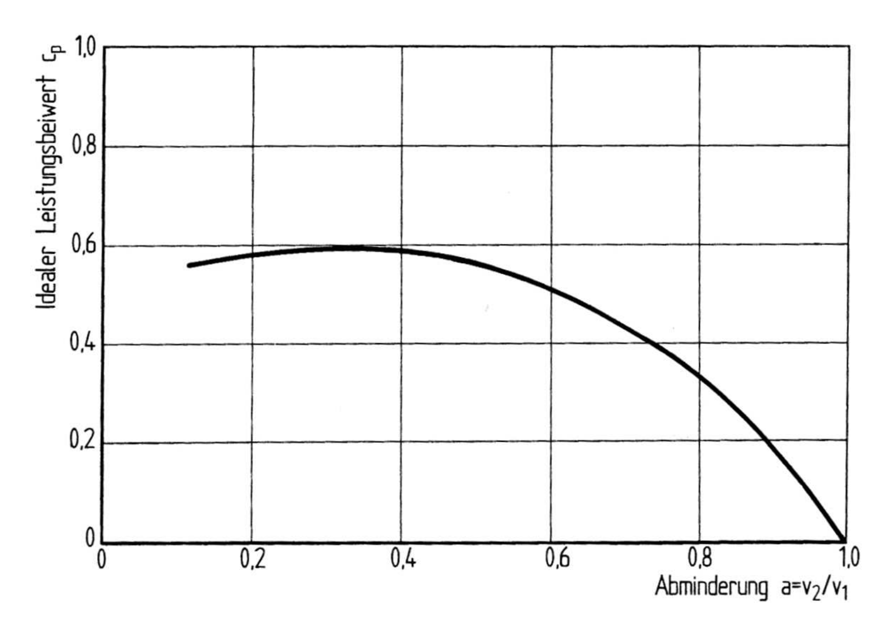


Abb. 2 Verlauf des Leistungsbeiwertes vor und hinter dem Energiewandler

2.3.2 Strömungswiderstand[3]

Bringt man einen beliebigen Körper in eine Luftströmung, bewirkt er einen Widerstand, den so genannter Strömungswiderstand (siehe Abbildung 3). Das heißt, dass auf ihn eine Kraft in Strömungsrichtung wirkt. Die Stärke dieser Kraft ist abhängig von der Form, der Größe dieses Körpers, der Strömungsgeschwindigkeit und der Luftdichte. Der Einfluss, welchen die Form des Körpers hat, wird mit dem Widerstandbeiwert c_w bestimmt.

Da in dieser Formel die Luftdichte eine bedeutende Rolle spielt, wird sie hier angeführt.

Luftdichte $\rho = 1{,}205 \frac{kg}{m^3}$ (20℃, 1 bar)

Mit der folgenden Formel kann man sich die Kraft ausrechnen, die entsteht, wenn Wind auf einen Körper trifft.

$$F_w = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot {v_w}^2$$

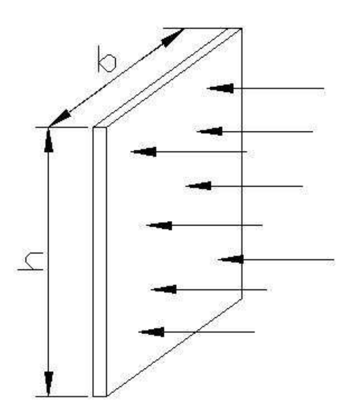


Abb. 3 Wind bläst auf die projizierte Fläche A des Rotors

[3] [vgl.HAUE2003 S.85ff]

Das Prinzip des Widerstandläufers (siehe Abbildung 4) – der Savoniusrotor ist ein Vertreter dieser Rotorart - ist, dem Wind Widerstand entgegenzusetzen und sich so antreiben zu lassen.

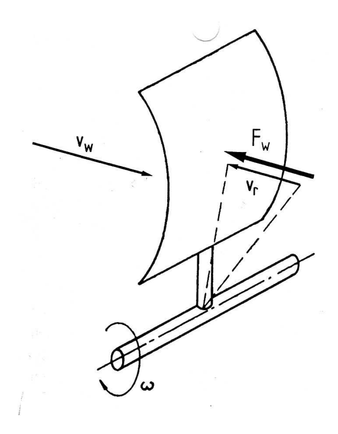


Abb. 4 Prinzip des Widerstandläufers

c_W ist der Luftwiderstandsbeiwert, der sich aus Form und Größe der angeblasenen Fläche ergibt, und kann der Abbildung 5 entnommen werden.

Körperform	Widerstandsziffer c_w
Kreisplatte	1,17
Rechteckplatte	h/b: 1 → 1,1; 2 → 1,15; 4 → 1,19; 10 → 1,29; 18 → 1,40; ∞ → 2,01
Halbkugel von außen angeströmt	ohne Boden 0,34 mit Boden 0,40
Halbkugel von innen angeströmt	ohne Boden 1,33 mit Boden 1,17
Zylinder von der Stirnseite her angeströmt	l/d: 1 → 0,91; 2 → 0,85; 4 → 0,87; 7 → 0,99
Kegel (ohne Boden) von der Spitze her angeströmt	α: 30° → 0,34; 60° → 0,51
schlanker Kegel von der Grundfläche her angeströmt	≈ 0,58
quadratisches Prisma senkrecht angeströmt	für $b \to \infty$ ≈ 2,05
quadratisches Prisma diagonal angeströmt	für $b \to \infty$ ≈ 1,55
Würfel senkrecht angeströmt	≈ 1,05
Würfel diagonal angeströmt	≈ 0,8

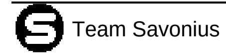
Abb. 5 Luftwiderstandsbeiwert

2.3.3 Schnelllaufzahl[4]

Der Leistungsbeiwert ist abhängig von Wind- und Umfangsgeschwindigkeit des Rotors. Dieses Verhältnis bezeichnet man als Schnelllaufzahl λ. Die Umfangsgeschwindigkeit wird auf dem äußersten Punkt des Rotors gemessen.

$$Schnelllaufzahl \lambda = \frac{v_u}{v_W} = \frac{Umfangsgeschwindigkeit}{Windgeschwindigkeit}$$

4 [vgl.HAUE2003 S.90ff]



3. Modell

3.1. Zielsetzung

Um den größtmöglichen Wirkungsgrad für den mechanischen Aufbau des Savoniusrotors zu erreichen, ergab sich die Notwendigkeit, zunächst ein Modell zu bauen. Dieses musste in keinem Maßstab zur großen Anlage stehen, sollte aber wichtige Eigenschaften, wie einen passenden Versatz, trotzdem erfüllen. Wie das „Original“, wurde auch das Modell zweistufig zu konzipiert.

Der Grundgedanke unseres Modells war, die optimale Stellung der Windleitschaufeln herauszufinden und den Rotor zu optimieren. Außerdem musste sich das Projektteam, während der Entwicklung des Modells, intensiv mit Fachliteratur und Problematik des Savoniusrotors befassen. Dadurch waren wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung der großen, stromerzeugenden Anlage in Bezug auf Lagerung, Rotoren, allgemeinen Aufbau, Gestell und Dimensionierung zu erwarten.

3.2. Konstruktion

3.2.1 Gestell

Das Gestell stellt eine solide Basis für den Savoniusrotor dar und bringt den Rotor in eine etwas erhöhte Position, da der Wind am Boden durch Reibung und Hindernisse gebremst wird. Trotzdem ist es preisgünstig, leicht zerlegbar und somit transportabel, da es aus günstigem Staffelholz, aus dem Baumarkt, gefertigt ist. Um es nicht nieder spannen zu müssen, steht das Modell auf zwei 1000 mm langen Füßen. An Problemstellen, wie der Verbindung von Beinen und Füßen, wurden Verstrebungen eingeplant. Um die Stabilität des Modells zu fördern, wurde es beidseitig gelagert und an den beiden Lagerpunkten Bohrungen für die Kugellager im Gestell angefertigt. Da das Modell stets von derselben Seite vom Lüfter angeblasen wird, nehmen die seitlichen Stützen für die obere Lagerung dem Savoniusrotor keinen Wind weg. Das Gestell ist in Abbildung 6 auf der folgenden Seite zu erkennen.

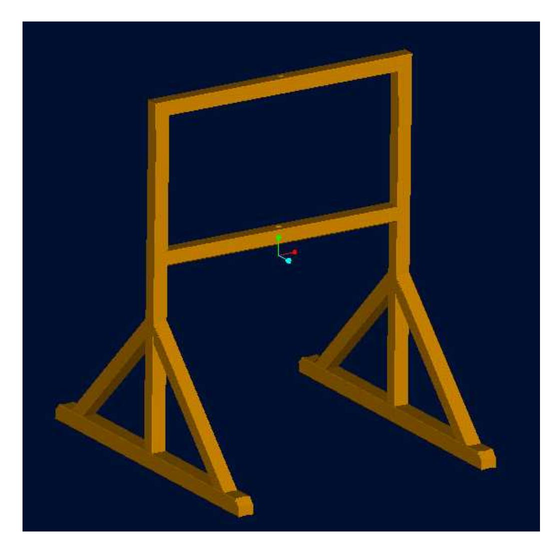


Abb. 6 Das konstruierte Gestell

3.2.2 Rotor

Um den Rotor bestmöglich optimieren zu können, bestand die Idee, das Modell so zu bauen, dass die Überschneidung der Rotorblätter stufenlos veränderbar ist. Das sollte durch Langlöcher in den Tellern realisiert werden. Die an die Rohrhälften angeschweißten Böden wären dann durch Muttern und Schrauben an die Teller montiert worden. Die Vorteile dieses Lösungsweges sind rasche und unkomplizierte Rotorumstellung sowie stufenloses Ermitteln der optimalen Rotorstellung.

Diese Lösung verfälscht aber das Ergebnis: ein Modifizieren der Rotorstellung würde auch den Gesamtdurchmesser verändern und somit die Drehzahl beeinflussen.

Eine andere Möglichkeit wäre, mehrere Modelle mit gleichem Gesamtdurchmesser und verschiedenem Versatz zu entwickeln (also mit anderen Rotordurchmessern). Da die Diplomarbeit aber zeitlich begrenzt ist, wurde beschlossen, nur ein Modell zu bauen und das Wissen aus der Fachliteratur zu übernehmen.

Die Fachliteratur spricht von einer optimalen Rotorstellung bei ca. 20 - 30% (vom Gesamtdurchmesser, siehe Abbildung 7 nächste Seite) Versatz.

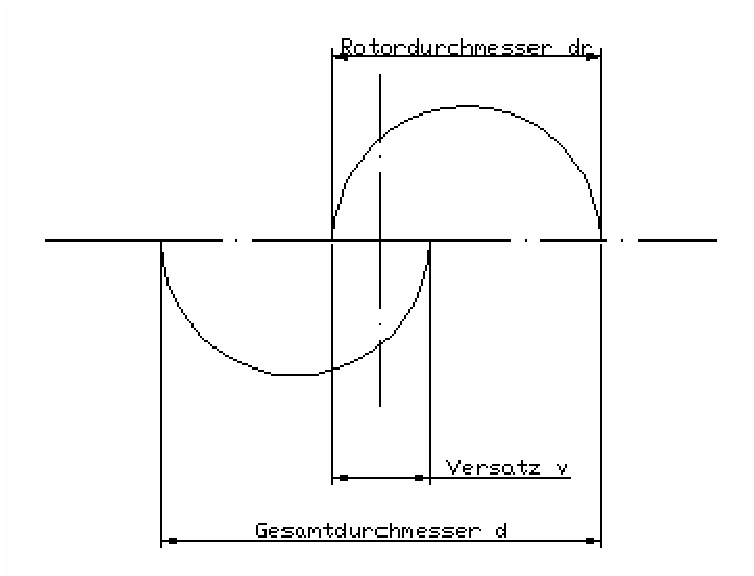


Abb. 7 Erklärungsskizze für die verwendeten Begriffe

Um Material zu sparen und gleichzeitig die Umwelt zu schützen, wurden zwei ausgediente 6 kg Lebensmitteldosen für die Fertigung der Rotoren gewählt. Diese Dosen hatten einen Durchmesser von 230 mm, der dem Rotordurchmesser entspricht. Durch ein Missverständnis wurde die Höhe des Rotors falsch berechnet. Die Höhe der beiden Stufen wurde mit dem Gesamtdurchmesser gleichgesetzt. Allerdings sollte die Höhe einer Stufe gleich dem Gesamtdurchmesser d und so die gesamte Höhe 2·d sein.

Der Versatz wurde mit $v = \frac{d}{100} \cdot 30$ berechnet. Da d noch nicht bekannt war, musste dieser Wert angenommen werden: d≈350mm – 400mm.

Die Berechnungen sind in unten stehender Tabelle 1 zu sehen.

Gesamtdurchmesser d	Versatz v	Rotordurchmesser d_r
350mm	105mm	227,5mm
360mm	108mm	234mm
370mm	111mm	240,5mm
380mm	114mm	247mm
390mm	117mm	253,5mm
400mm	120mm	260mm

Tab. 1 Berechnung des Versatzes

Weil es sich hier nur um das Modell handelt, waren genauere Berechnungen nicht nötig.

Da anfangs geglaubt wurde, dass die Höhe mit der Breite in einem Verhältnis von 1:1 stehen soll, wurden die Dosen jeweils um 75 mm gekürzt:

$$d = h_{soll} = 350mm$$
$$h_{ist} - h_{soll} = (2 \cdot 250mm) - 350mm = 150mm$$
$$\frac{150mm}{2} = 75mm$$

Schon bei den Tests wurde bemerkt, dass dieser Aufbau nicht das Optimum sein konnte, weswegen in der Fachliteratur über Savoniusrotoren das richtige Verhältnis von Höhe zu Breite herausgesucht wurde. Es wurde herausgefunden, dass das Verhältnis von Höhe zu Breite nicht 1:1, sondern 2:1 ist.

Die Angabe des richtigen Verhältnisses ist nicht sehr genau, weshalb das falsche Verhältnis nicht weiter zu beachten war, da es die Funktionsweise des Rotors nicht empfindlich störte.

Um die Montage zu erleichtern sind die Teller einige Millimeter breiter als der Gesamtdurchmesser. Die Teller erhielten eine Bohrung für die Welle in der Mitte und die Teller wurden mit Winkeln an den Rotorblättern angenietet. Die Konstruktion kann man in Abbildung 8 sehen:

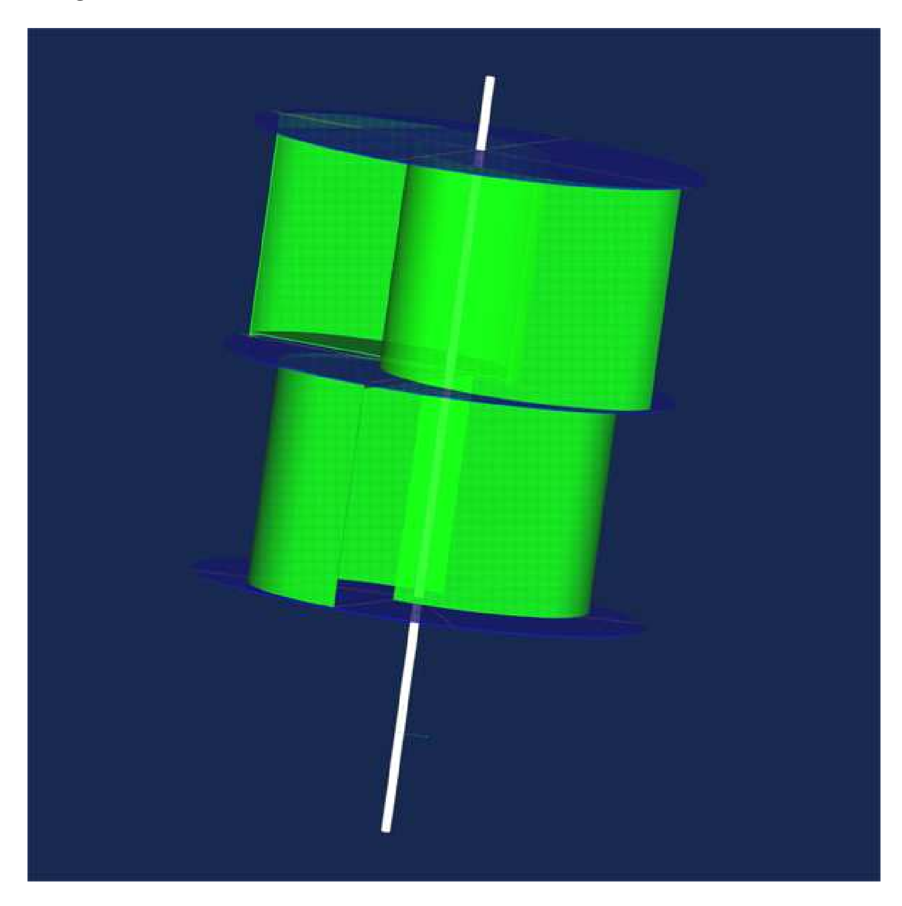


Abb. 8 Der Rotor in ProE konstruiert

3.2.3 Welle

Als Welle wird eine Gewindestange verwendet. So können die Lager und der Rotor mit Muttern fixiert werden. Der Durchmesser der Stange beträgt 8 mm, da diese aus Restbeständen der Firma Römerquelle verfügbar war.

3.2.4 Windleitschaufeln

Grundlagen

Die Idee hinter den Windleitschaufeln besteht darin, Wind, der sonst ungenutzt bleiben würde, zum Rotor hin zu leiten. Da der Abstand zwischen den Blechen zum Rotor hin abnimmt, wird die Geschwindigkeit der einströmenden Luft erhöht und somit auch die Drehzahl der Windkraftanlage gesteigert.

Grundsätzlich gilt, dass je weiter die Leitschaufeln vom Rotor weg ragen, desto mehr Wind kann zur Anlage geleitet werden. Allerdings bringen zu große Bleche konstruktive Probleme mit sich. Das Gewicht spielt bei den Windleitschaufeln nur eine geringe Rolle, da diese am Gestell und nicht am Rotor, welcher besonders leicht sein soll, angebracht werden.

Damit die um den Rotor mitlaufenden Luftwirbel nicht gestört werden, muss ein Abstand zwischen Leitschaufelinnenkante und Rotor vorhanden sein [vgl. Scha1987 S.287].

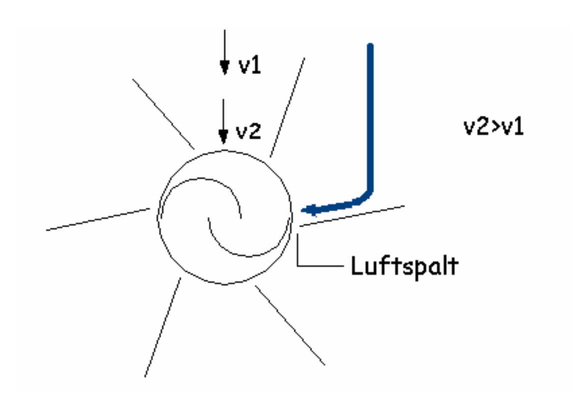


Abb. 9 Prinzip der Windleitschaufeln

Der Nachteil der Leitbleche ist, dass die Windunabhängigkeit verloren geht. Aus diesem Grund sollten möglichst viele Windleitschaufeln verwendet werden, mindestens jedoch drei.

Am Modell wurde getestet, wie stark sich die Schaufeln auf die Drehzahl des Rotors auswirken. Außerdem wurde die optimale Stellung der Bleche ermittelt.

Dimensionierung

Zunächst wurde überlegt, die Anlage nur mit drei Windleitschaufeln auszulegen. Durch die Erkenntnis, dass die Windunabhängigkeit dadurch aber beeinträchtigt wird, wurde beschlossen sechs Bleche anzufertigen. Wegen des Gestells und den umgewinkelten Montageflächen wäre das Verwenden von mehr Windleitschaufeln problematisch gewesen.

Die Montage der Schaufeln erfolgte durch Scheiben über und unter dem Rotor. Diese sollten nicht bis zur Außenkante der Leitschaufeln reichen, sondern mussten nur genug Platz zur Montage der Windleitschaufeln bieten. Um die Stellung der Windleitschaufeln verändern zu können, war geplant, Langlöcher in diese Scheiben zu schneiden. Auf diese Weise konnten aber nur schwer alle Bleche exakt auf dieselbe Stellung gebracht werden. So sollten anstelle von Langlöchern Bohrungen mit dem Winkelabstand von 15° gefertigt werden (siehe Abbildung 11).

Da bei unseren Versuchen, durch den Lüfter, nur ein kleiner Bereich angeblasen wird, war es nicht nötig sehr weit hinaus reichende Schaufeln zu fertigen. Es wurde beschlossen, 300 mm breite Bleche zu verwenden.

Mit einem 1,75 mm dicken Blech wurde eine sehr hohe Stärke gewählt. Dadurch wurde aber eine hohe Stabilität und Steifigkeit gewährleistet.

Da auf den Holzscheiben das gesamte Gewicht der Windleitschaufeln lastet, wurden auch hier Verstrebungen zwischen Scheiben und Beinen eingeplant (siehe Abbildung 12).

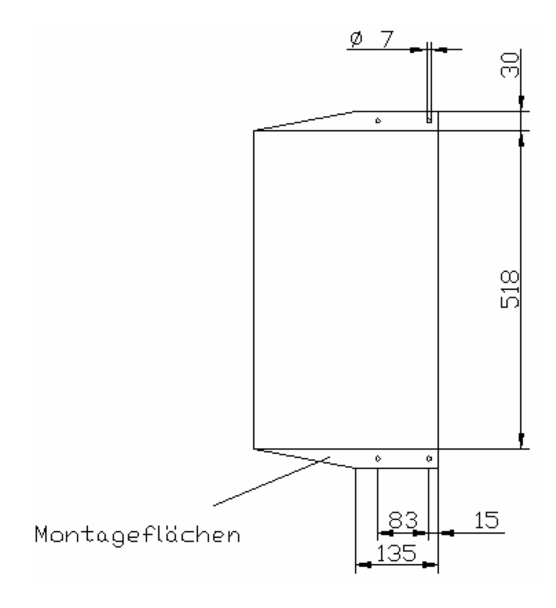


Abb. 10 Windleitschaufeln vor dem Biegen

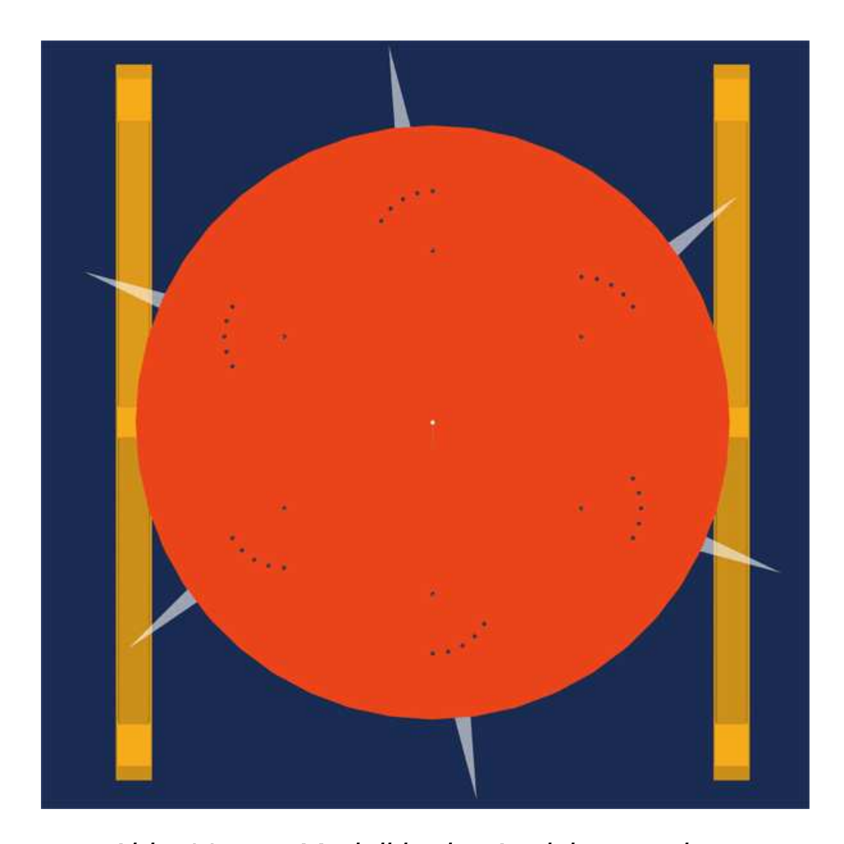


Abb. 11 Modell in der Ansicht von oben.

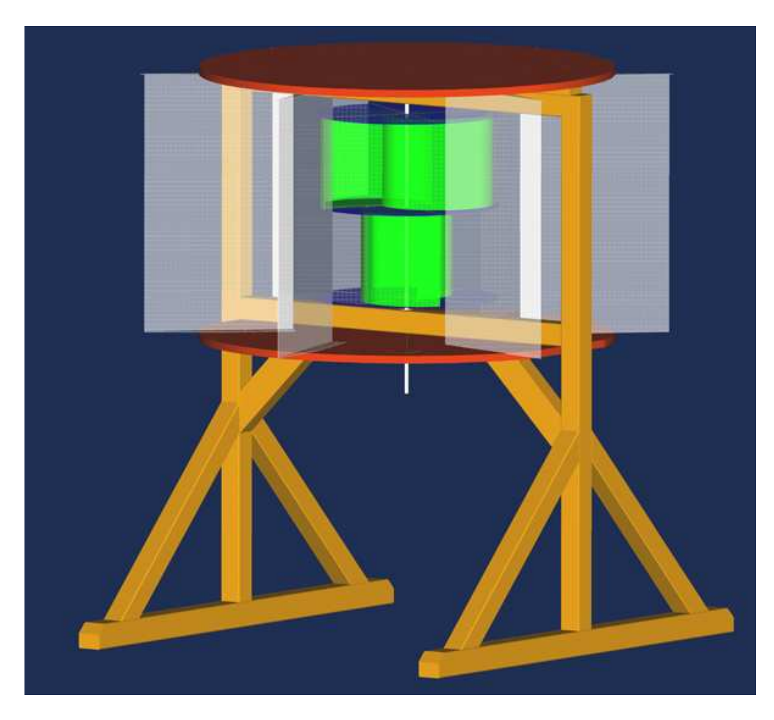


Abb. 12 Das gesamte Modell nach der Planung

3.3. Fertigung

3.3.1 Gestell

Die einzelnen Komponenten wurden mit einer Kreissäge zugeschnitten. Beim oberen Querträger und bei den beiden Beinen wurden Gehrungen geschnitten, um die Teile besser miteinander verbinden zu können. Um das Gestell zu stabilisieren, wurden nicht nur Verstrebungen eingebaut, sondern auch Metallwinkel am Übergang von Beinen zu Füßen angeschraubt. Die Komponenten wurden mit M5x50 Schrauben verbunden. Damit der Rotor später nicht schief steht, mussten die beiden Löcher der Querträger genau in der Mitte liegen.

Nachdem die Bohrungen mit einem Durchmesser von 20 mm in den Querträgern gefertigt waren, wurden für ein besseres Erscheinungsbild und zur Verminderung der Verletzungsgefahr Fasen auf die Füße geschnitten.

3.3.2 Rotor

Wie im Kapitel 3.2.2 schon erwähnt, sollten die Rotoren aus zwei Lebensmitteldosen hergestellt werden. Die notwendige Kürzung der Dosen wurde mit einem Winkelschleifer durchgeführt.

Die drei Teller wurden aus 1 mm starkem Stahlblech gefertigt, welches uns aus Restbeständen der Firma Römerquelle zu Verfügung gestellt wurde. Der Gesamtdurchmesser des Rotors betrug 350 mm, weshalb die Teller einen Durchmesser von ca. 360 mm haben sollten. Es stand allerdings kein geeignetes Werkzeug zur Verfügung, um einen so großen Radius anzureißen. Ein Deckel eines Leimkübels entsprach allerdings ungefähr dem gewünschten Maß der Teller und wurde so als Vorlage verwendet. Nach dem Anzeichnen der Kreise wurden die Teller grob mit einer Handtafelschere zugeschnitten, um nachher den Tellern mit dem Winkelschleifer eine runde Form geben zu können. Zwar war diese Art der Fertigung nicht sehr professionell, allerdings war die Rundheit der Teller für das Modell zufrieden stellend.

Um die Teller mit den Rotorblättern verbinden zu können wurden Winkel angefertigt, die anschließend mit Rotorblättern und Tellern vernietet wurden. Nach dem Zuschneiden der Winkel wurden sie gebohrt. Da keine Biegemaschine zur Verfügung stand, mussten die Winkel am Schraubstock gebogen werden. Diese Fertigung führte nicht immer zu genau 90° Winkeln, was bei der Monta ge auch für Probleme sorgte.

Die Montage begann nachdem die Bohrungen für das Nieten an Tellern und Rotorblättern gefertigt waren. Durch die Ungenauigkeit der Winkel lagen die

Rotorblätter nicht immer genau an den Tellern auf. Diese Zwischenräume hätten den Rotor den Wind nicht optimal nutzen lassen, da die Spalten einen Teil des Windes hindurch strömen ließen. So wurden die Spalten nach dem Vernieten mit Silikon aufgefüllt. Die Welle wurde mit einer Metallsäge so zugeschnitten, dass die Welle ca. 200mm länger war als der Rotor. Da es sich bei der Welle um eine Gewindestange handelt, konnte diese mit dem Rotor einfach durch Muttern verbunden werden.

3.3.3 Windleitschaufeln

Das Material der Windleitschaufeln stammt von der Firma Werfring und auch die Fertigung wurde in der Werkstatt unseres Hauptsponsors durchgeführt. Zunächst wurden sechs 578x300mm große und 1,75mm starke Bleche zugeschnitten. Nach dem Schneiden der Schrägen und dem Fertigen der Bohrungen, wurden die Bleche umgekantet.

Die Scheiben zur Befestigung der Windleitschaufeln wurden aus altem lackiertem Verkleidungsholz gefertigt. Da die Rundheit dieser Scheiben nur dem Erscheinungsbild dienlich ist, konnte auf eine einfache, etwas ungenaue Methode zum Anreißen des Kreises zurückgegriffen werden: in der Mitte der Scheiben ein Körner, der über eine dem beliebig gewählten Radius entsprechende Schnur mit einem Stift verbunden war. Mit einer Stichsäge wurden die Scheiben zugeschnitten und anschließend wurden die Bohrungen gefertigt.

Nachdem alle Komponenten gefertigt waren, konnte das Modell zusammengebaut werden.

3.4. Messungen

Die Messungen konnten Aufschluss darüber geben, in welcher Stellung die Windleitschaufeln verwendet werden sollten. Dazu wurde bei verschiedenen Windstärken ohne Windleitschaufeln und mit sechs Windleitschaufeln in allen Stellungen getestet. Dabei war zu beachten, dass bei allen Messungen die Rahmenbedingungen für die Tests gleich waren. Das heißt, der Abstand von Modell und Lüfter musste immer gleich sein und die Tür des Testraums war immer geöffnet, die Fenster geschlossen.

Zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit wurde ein Anemometer verwendet. Das Schalenkreuzanemometer misst mithilfe von halbkugelartigen Schalen die Windgeschwindigkeiten und gibt diese digital auf einem Display aus.

3.4.1 Windkanal

Um das Modell mit Wind betreiben zu können, sollte ein Windkanal aufgebaut werden. Es wäre zu schwer gewesen, das Modell im natürlichen Wind zu testen, da der Wind böig ist und somit keine konstante Windgeschwindigkeit hat. Um Messkurven aufnehmen zu können, war aber ein konstanter Wind nötig.

Zur Erzeugung des künstlichen Windes diente ein BMW-Lüfter. Da dieser auf einer Höhe mit dem Modell stehen soll, benötigte auch er ein Gestell. Dieses wurde aus Holz von einem ausrangierten Bett gefertigt, da an das Material keine hohen Ansprüche gestellt waren. Auch die Stabilität und Festigkeit des Aufbaus war nicht sonderlich von Bedeutung, da auf den Lüfteraufbau keine großen Kräfte wirkten.

Der Aufbau des Windkanals ist in der nachstehenden Abbildung 13 zu erkennen. Der Abstand zwischen Lüfter und Rotormodell wurde markiert um sicherzugehen, dass die Messungen immer unter gleichen Bedingungen durchgeführt wurden.

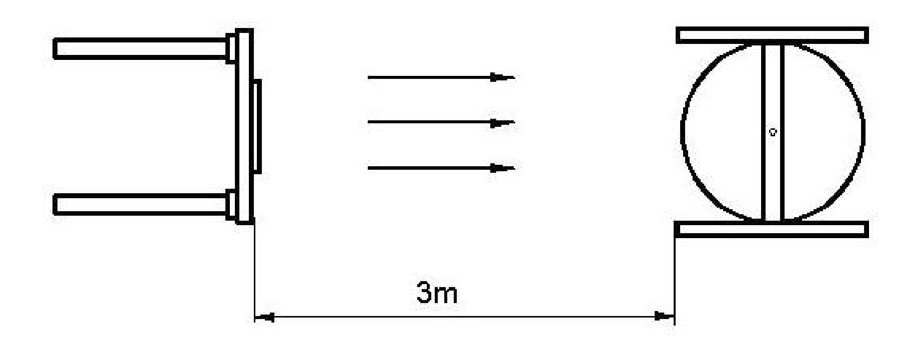


Abb. 13 Skizze des Windkanals



Abb. 14 Foto vom Windkanal

Die Steuerung des Lüfters wurde selbst gefertigt. Es sollte möglich sein, den Lüfter stufenlos, über ein Potentiometer ansteuern zu können. Da als Versorgung für den Lüfter ein 12V Akkumulator nötig war, um diesen mit 12V und 20A zu versorgen, stand ausreichend Leistung zur Verfügung, um auch die Steuerung über den Akkumulator mitzuversorgen. Der Schaltplan der Steuerung befindet sich in Anhang G. Da bereits eine Testplatine aus dem Labor die Anforderungen der Schaltung erfüllte, wurde diese mit den nötigen Bauteilen bestückt. Der Bestückungsplan befindet sich auch in Anhang G.

Das Programm zur Ansteuerung befindet sich in Anhang I. Nach der Initialisierung des PICs wird die Spannung, die am Potentiometer abfällt, über den PIN RA0 eingelesen. Zur Ansteuerung des Lüftermotors wurde eine PWM verwendet. Da das Tastverhältnis der PWM ebenfalls mit 8-Bits eingestellt wird, kann der gleichlange Analogwert dafür übernommen werden. Da der Motor jedoch nur mit 90% angesteuert werden sollte wird dies noch zuvor überprüft. Hierfür wird ein Wert der 10% entspricht zum Analogwert addiert. Wird dadurch ein Überlauf erzeugt ist der Wert zu hoch und es wird der Wert für 90% an die PWM übergeben. Anderenfalls wird der gewandelte Wert übernommen.

3.4.2 Messungsaufbau

Die erste Idee um die Drehzahl des Rotors zu messen war, die Umdrehungen mit einem Light Dependent Resistor (LDR) zu erfassen. Dazu wird ein Oszilloskop parallel zum Lastwiderstand geschaltet (siehe Abbildung 15). Der LDR wird von einer Diode beleuchtet und hat nun einen kleinen Widerstand. Ein am Rotor angebrachter Papierstreifen unterbricht den Lichtstahl zwischen Diode und LDR. Die Folge ist, dass der Widerstand steigt. Das Oszilloskop zeigt so die Unterbrechungen an. Über die Abstände zwischen den Unterbrechungen kommt man auf die Drehfrequenz des Rotors.

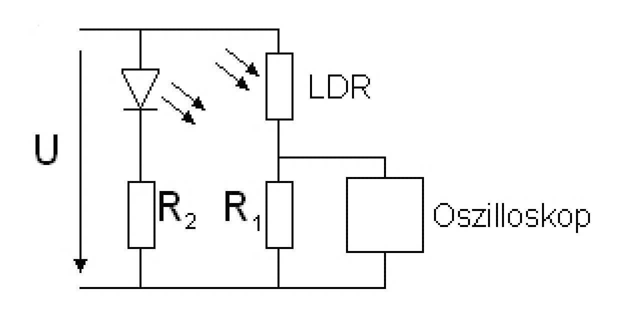


Abb. 15 Schaltplan mit LDR

Der LDR hat einen Widerstand zwischen 1 und 1000 kΩ bei normalem Umgebungslicht. Daher wurde der Lastwiderstand im arithmetischen Mittel des

Bereichs angesetzt und beträgt somit 470 kΩ. Betrieben wurde die Schaltung mit 5 V. Wie in Abbildung 16 zu sehen ist wurden zwei Blechprofile zusammengeschweißt, um die LED und den LDR anbringen zu können.

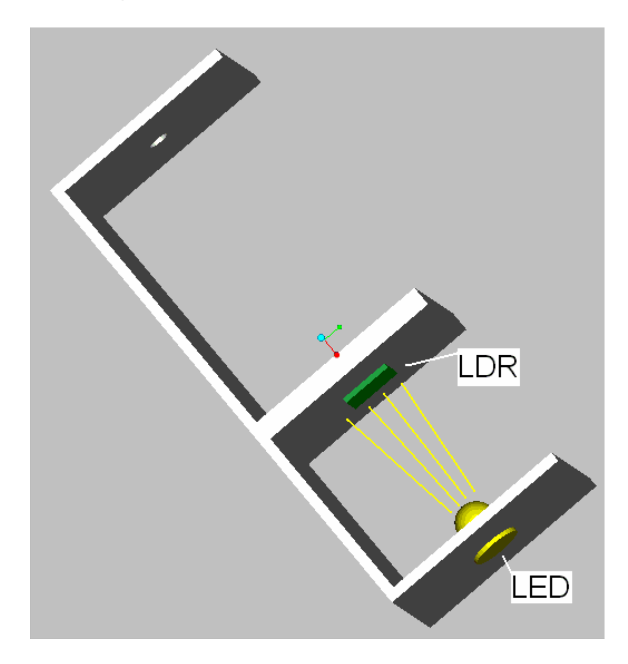


Abb. 16 Messkonstruktion

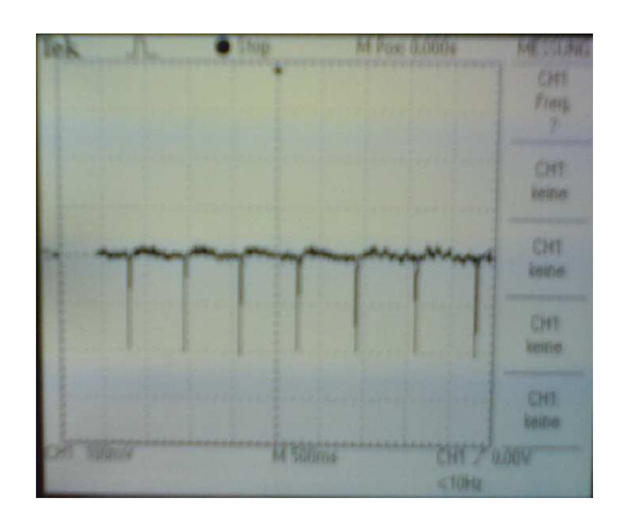


Abb. 17 Signal am Oszilloskop mit LDR

In Abbildung 17 ist zu erkennen, dass das Oszilloskop die vom LDR verursachten Unterbrechungen anzeigt. Durch das Umgebungslicht werden jedoch Störungen in die Messergebnisse gebracht und daher verfälscht.

Der nächste Lösungsweg war der Einsatz eines Reed-Kontaktes. Dazu wurde das Oszilloskop parallel zum Reed-Kontakt geschaltet (siehe Abbildung 18). Das Prinzip der Schaltung ist, dass das Oszilloskop das Eingangssignal (5V) anzeigt. Dieses Signal wird unterbrochen, wenn der Reed-Kontakt in das Magnetfeld, verursacht durch einen Dauermagneten am Rotor, kommt und sich schließt.

Der in Abbildung 18 ersichtliche Lastwiderstand wurde mit 1000 Ω gewählt. Die Eingangsspannung beträgt 5 V.

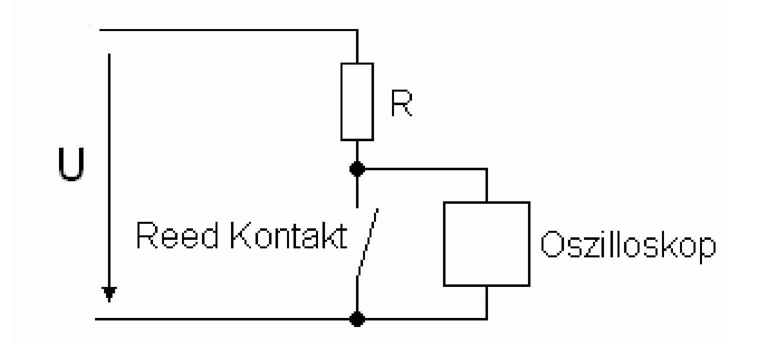


Abb. 18 Schaltplan mit Reed-Kontakt

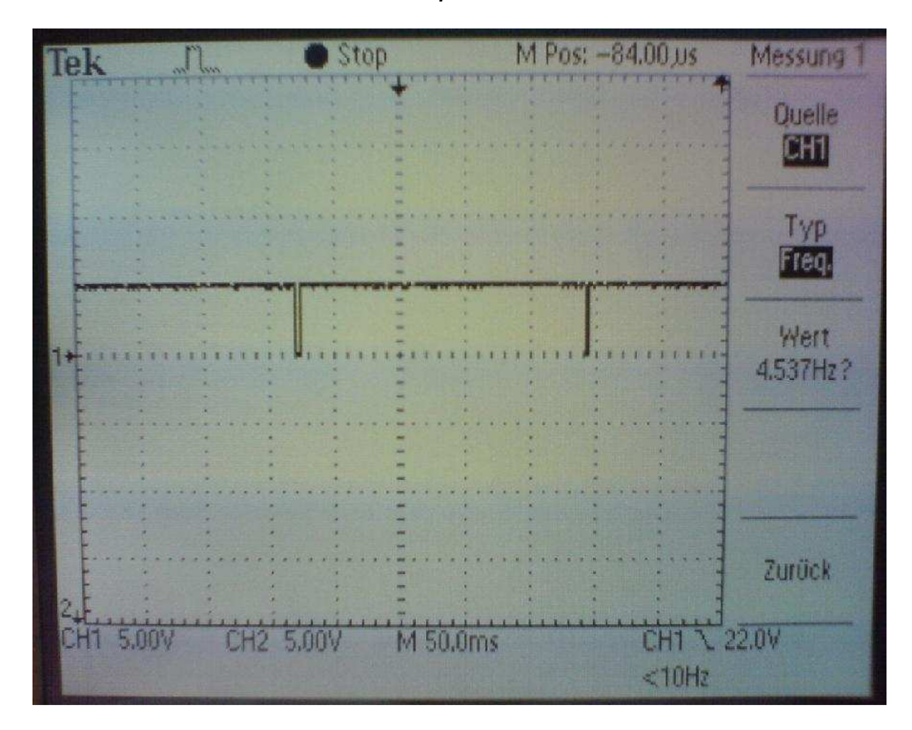


Abb. 19 Signal am Oszilloskop mit Reed-Kontakt

3.4.3 Messergebnisse

	Rotor Drehfrequ.	**Rotor Drehzahl**	**Windgesch. vor Rotor**	**Windgesch. hinter Rotor**	**mech. Leistung**
	f	**n**	**v_1**	**v_2**	**P**
Ohne Leitschaufeln					
ohne Silikon:	2,95 Hz	177 U/min	3,8 m/s	1,6 m/s	2,61 W
Ohne Leitschaufeln					
mit Silikon:	3,14 Hz	188 U/min	3,8 m/s	1,5 m/s	2,63 W
	4,00 Hz	240 U/min	3,9 m/s	1,1 m/s	2,85 W
Leitschaufeln 0°	1,14 Hz	68 U/min	2,4 m/s	1,7 m/s	0,48 W
Leitschaufeln 15°	0,89 Hz	53 U/min	2,4 m/s	2,1 m/s	0,25 W
Leitschaufeln 30°	2,60 Hz	156 U/min	2,8 m/s	1,6 m/s	0,95 W
	4,00 Hz	240 U/min	4,0 m/s	2,3 m/s	2,75 W
Leitschaufeln 45°	2,27 Hz	136 U/min	3,5 m/s	2,5 m/s	1,46 W
Leitschaufeln 60°	2,63 Hz	158 U/min	4,5 m/s	3,5 m/s	2,60 W

Tab. 2 Mess- und Rechenergebnisse am Modell

Für die Berechnungen waren folgende Formeln notwendig:

$$n = f \cdot 60$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)$$

Aus diesen Tests ging hervor, dass es nicht nötig war, bei der großen Anlage Windleitschaufeln mit einzuplanen. Der einzige Wert für die Leistung, der dem ohne Windleitschaufeln entspricht, ist jener bei einer 30°-Neigung der Schaufeln. Wie befürchtet nehmen die Windleitschaufeln dem Savoniusrotor die Windunabhängigkeit und daher läuft der Rotor bei dieser Einstellung der Schaufeln nicht selbstständig an. Auch bei 15° und 60° benötigt der Rotor eine „Start hilfe". Durch die Leitschaufeln wird das mitrotierende Feld abgebremst beziehungsweise gestört, daher verliert der Rotor an Leistung.

Deshalb wurden die Tests ohne Windleitschaufeln fortgesetzt. Die Ergebnisse dieser Messergebnisse sind in der folgenden Tabelle 3 ersichtlich.

Rotor Drehfrequenz	**Rotor Drehzahl**	**Windgesch. vor Rotor**	**Windgesch. hinter Rotor**	**mech. Leistung**
F	**n**	**v1**	**v2**	**P**
2,35 Hz	141 U/min	5,1 m/s	2,0 m/s	6,36 W
2,76 Hz	166 U/min	5,0 m/s	2,4 m/s	5,79 W
3,00 Hz	180 U/min	5,5 m/s	2,5 m/s	7,81 W
3,34 Hz	200 U/min	6,2 m/s	3,3 m/s	10,65 W
3,52 Hz	211 U/min	6,5 m/s	3,3 m/s	12,50 W
3,97 Hz	238 U/min	7,0 m/s	3,6 m/s	15,54 W
4,15 Hz	249 U/min	7,1 m/s	3,8 m/s	15,95 W
4,45 Hz	267 U/min	7,7 m/s	4,3 m/s	19,92 W
4,82 Hz	289 U/min	7,9 m/s	4,4 m/s	21,54 W
5,14 Hz	308 U/min	8,2 m/s	5,2 m/s	21,92 W
5,73 Hz	344 U/min	9,1 m/s	5,4 m/s	31,65 W
6,10 Hz	366 U/min	9,2 m/s	5,1 m/s	34,11 W
6,41 Hz	385 U/min	9,5 m/s	5,8 m/s	35,24 W
6,61 Hz	397 U/min	10,0 m/s	5,5 m/s	43,98 W
6,98 Hz	419 U/min	10,3 m/s	5,5 m/s	48,75 W
7,35 Hz	441 U/min	10,6 m/s	5,8 m/s	52,52 W
7,76 Hz	466 U/min	10,9 m/s	5,8 m/s	57,87 W
8,17 Hz	490 U/min	11,4 m/s	5,8 m/s	67,40 W
8,56 Hz	514 U/min	11,9 m/s	6,2 m/s	75,97 W
8,62 Hz	517 U/min	12,3 m/s	6,4 m/s	83,94 W
8,74 Hz	524 U/min	13,5 m/s	7,0 m/s	111,13 W
9,33 Hz	560 U/min	13,7 m/s	7,3 m/s	114,83 W
8,80 Hz	528 U/min	13,9 m/s	6,3 m/s	126,16 W
9,05 Hz	543 U/min	14,0 m/s	7,0 m/s	125,59 W

Tab. 3 Mess- und Rechenergebnisse am Modell ohne Windleitschaufeln

4. Savonius Oben Ohne

4.1. Planung

Ursprünglich war geplant, den Savoniusrotor so kostengünstig wie möglich zu fertigen und daher Altwaren, wie Fässer und Kfz-Teile zu verwenden. Unser Hauptsponsor, die Firma Werfring, wollte sein Logo allerdings nicht auf ein Produkt aus Altwaren platzieren und schlug vor, für hochwertigeres Material selbst aufzukommen. So wurde für den Rotor und die Welle nicht rostender Chrom-Nickel-Stahl (X5CrNi18-10) und für das Gestell Halbzeug aus Baustahl (S235JR) verwendet werden, da diese Werkstoffe bei der Firma Werfring bereits lagernd waren.

Die Grundidee war, den Savoniusrotor, so wie unser Modell und die meisten bereits entwickelten Rotoren, beidseitig zu lagern. Zunächst wurde überlegt, auch die Windleitbleche, von denen wir zu diesem Zeitpunkt noch nicht wussten, dass wir sie nicht einsetzen werden, beidseitig zu befestigen. Die obere Befestigung sollte durch einen Stahlblechring, der wiederum am Gestell angebracht werden sollte, erfolgen. Die hohen Kosten und die schwierige Produktion dieses Ringes und des zusätzlich notwendigen Gestells brachten uns zu der Entscheidung, den Savoniusrotor nur einseitig zu lagern. Diese Bauart fordert hohe Ansprüche an die Lager:

> Die einseitige Lagerung in Verbindung mit einer Unwucht führte nämlich zu starken Vibrationen bei hohen Drehzahlen. [SCHU2005 S.7]

Daher sollten hochwertige Materialen verwendet werden, um solchen Vibrationen vorzubeugen. Außerdem ist der große Vorteil der einseitigen Lagerung, dass der Wind wirklich rundum auf den Rotor wirken kann und dass kein Gestell die mit dem Rotor mitlaufenden Wirbeln stört.

Ermöglicht wurde die einseitige Lagerung durch zwei Lager, die 350 mm voneinander entfernt sind. Je weiter die Lager voneinander entfernt platziert sind, desto stabiler läuft die Welle.

4.1.1 Rotor

Die Fachliteratur gibt einige Vorgaben bezüglich der Grundabmaße des Savoniusrotors. Da sich diese, laut Autoren, bewährt haben und es nicht möglich war, die optimale Rotorstellung am Modell zu messen, wurde auch die große Anlage den bereits entwickelten Rotoren nachempfunden.

So waren bereits Anhaltspunkte, wie das Verhältnis von Rotorhöhe zu –durchmesser, bereits vorhanden.

Rotorblätter

Die Grundabmaße der Rotorblätter wurden von uns frei gewählt. Von ihnen hängen die Maße aller anderen Bauteile, wie Teller, Welle und Gestell, ab. Es war wichtig, den Rotor groß genug zu bauen, um genügend Leistung für das Laden des Akkumulators zu liefern. Andererseits sollte nicht unnötig viel Material verwendet werden.

Die Höhe der Rotorblätter wurde mit 600 mm gewählt. Da Höhe und Breite einer Rotorstufe im Verhältnis 1:1 stehen und der Versatz ca. 20 - 30% des Gesamtdurchmessers ist, ergibt sich dadurch folgende Berechnung:

$$Versatz = \frac{Gesamtdurchmesser}{100} \cdot 25 = \frac{600mm}{100} \cdot 25 = 150mm$$

$$Rotorblattdurchmesser = \frac{Gesamtdurchmesser + Versatz}{2} = \frac{600mm + 150mm}{2} = 375mm$$

Um auf das abzuschneidende Blechstück zu kommen, wird der Rotorblattdurchmesser mit $\frac{\pi}{2}$ multipliziert:

$$375mm \cdot \frac{\pi}{2} = 589{,}05mm \approx 590mm$$

Die Abmaße der vier zuzuschneidenden Bleche ergaben 600 mm x 590 mm. Die Wandstärke wurde mit 1,25 mm gewählt. Nach dem Zuschneiden wurden die Rotorblätter auf den richtigen Radius in einer Walze gebogen.

Teller

Bei den Tellern ist die Symmetrie für das Drehverhalten des Savoniusrotors äußerst wichtig. Deshalb mussten die ∅ 42 mm Bohrungen genau in der Mitte der Teller liegen und die beiden Bohrbilder, die auch auf den Steifigkeitsscheiben zu finden sind, mit hoher Genauigkeit gefertigt werden.

Der Durchmesser der Teller richtet sich nach dem Durchmesser des Rotors, welcher ∅ 600 mm beträgt. Für Montage und Schweißnähte wurden an beiden Seiten 10 mm hinzugerechnet, woraus sich der Tellerdurchmesser von ∅ 620 mm ergibt.

Die Fachliteratur spricht bei Stahlblech von einer Mindeststärke von einem Millimeter [vgl. SCH2005 S.12]. Da es aber nicht möglich war, verschiedene Wandstärken auszuprobieren, wurde eine Tellerstärke von 2 mm gewählt. Ein nur 1 mm starker Teller hätte für Probleme beim Verschweißen von Tellern und Rotorblättern gesorgt, da dünne Bleche beim Schweißen leicht durchbrennen.

In Abbildung 20 kann man erkennen, wie die Teller anzufertigen waren.

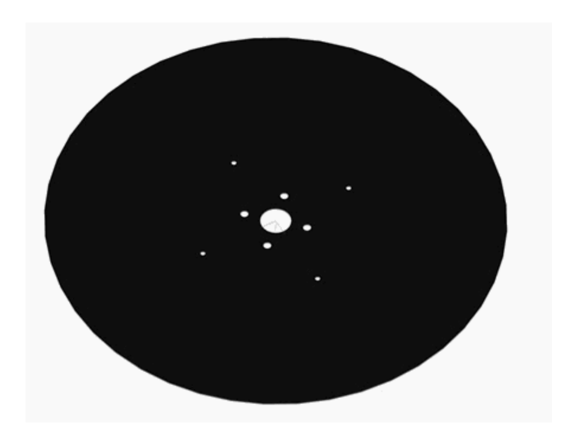


Abb. 20 ProE Zeichnung der Teller

Steifigkeitsscheiben

Wie bereits erwähnt, sollte der Rotor, und somit auch die Steifigkeitsscheiben, aus nicht rostendem Chrom-Nickel-Stahl (X5CrNi18-10) gefertigt werden. Die Seifigkeitsscheiben wurden deshalb verwendet, weil befürchtet wurde, dass sich die Teller durch das Gewicht der Rotorblätter hinab biegen könnten.

> Auf die stabilisierenden Speichen sollte man bei dieser Rotorgröße nicht verzichten, da sonst zu große Materialstärken für die Teller erforderlich wären. [SCHU2005 S.16]

Statt Speichen wurden Scheiben verwendet, weil das Verbinden von Speichen und Tellern die Teller womöglich verformt hätte.

Da die Steifigkeitsscheiben 3 mm dick sind, verfügen sie über eine hohe Masse. Diese würde, wenn die Scheiben nicht genau in der Mitte lägen, ein Unrundlaufen verursachen.

Für den Durchmesser der Scheiben musste ein Kompromiss zwischen Masse und Stabilität gefunden werden. Einerseits durften die Scheiben nicht zu schwer werden, andererseits sollten sie trotzdem so weit wie möglich hinaus reichen. Die Steifigkeitsscheiben sollten rund 40% der Teller bedecken, weshalb sie mit dem Durchmesser ∅ 245 mm geplant wurden.

Für die 40 mm dicke Welle musste genau in der Mitte eine Bohrung mit einem Durchmesser von ∅ 42 mm entstehen, um bei der Montage etwas Spielraum zur Verfügung zu haben. Weiters waren noch zwei Bohrbilder anzufertigen: eines zum Fixieren der Flanschplatten und eines zum Verbinden mit den Tellern. Die Schrauben

des inneren Lochkreises (für die Flanschplatte) sollten ein M10 Gewinde haben, die des äußeren ein M6, da hier geringere Kräfte auftreten.

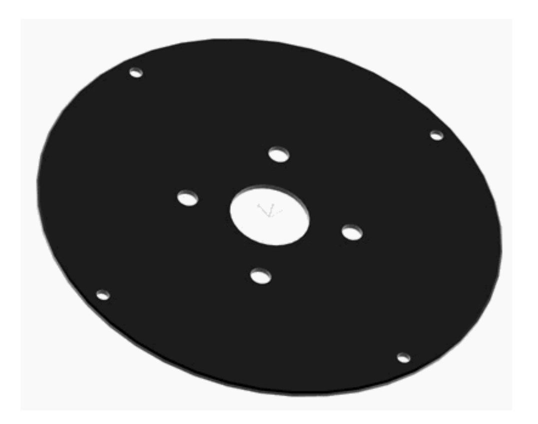


Abb. 21 ProE Zeichnung der Steifigkeitsscheiben

Flanschplatte mit Stellring

Die Welle wird mit dem Rotor durch eine Schraubverbindung fixiert. Dies erfolgt durch zwei Stellringe mit Wurmschrauben, ähnlich wie in Abbildung 22.



Abb. 22 Stellring

Um die Stellringe am Rotor anbringen zu können, mussten Flanschplatten verwendet werden. Laut unserem Hauptsponsor gab es Bauteile, die Stellring und Flanschplatte kombinierten. Zur Not können diese Teile aber auch selbst angefertigt werden.

Die einzige Anforderung an diese Bauteile war, dass sie den Innendurchmesser ∅ 40 mm aufwiesen. Außendurchmesser, Höhe und Material hatten eine große Toleranz.

Welle

Die Welle sollte durchgehend von der Spitze des Rotors bis zum Generator reichen. Die Länge der Welle ergab sich aus folgender Berechnung:

2 · Rotor-Wellenverbindung + 2 · Steifigkeitsscheiben + 3 · Teller + 2 · Rotorblätter + 2 · Lager + 2 · Lagerplatte + 2 · Träger + Lagerabstand + Wellenabsatz =

$2 \cdot 26$ mm + $2 \cdot 3$ mm + $3 \cdot 2$ mm + $2 \cdot 600$ mm + $2 \cdot 44{,}5$ mm + $2 \cdot 15$ mm + $2 \cdot 50$ mm + 240,5 mm + 279 mm = 2002,5 mm

Der Wellenabsatz am Schluss der Welle war für das Anbringen des Generators vorgesehen. Nach der Festigkeitsberechnung ergab sich für den Wellendurchmesser der Wert von ∅ 35 mm. Da das Axiallager aber einen Absatz auf der Welle benötigt, musste die Welle beim Rotor durchgehend ∅ 40 mm Durchmesser haben. Über eine Länge von 1274 mm hat die Welle daher einen Durchmesser von ∅ 40 mm, für die nächsten 540 mm einen von ∅ 35 mm, da die beiden Lager denselben Durchmesser haben. Das letzte Stück, das 200 mm lang ist, hat einen Durchmesser von ∅ 25 mm. Die Berechnung des erforderlichen Querschnitts befindet sich im Kapitel 4.2.3.

4.1.2 Gestell

Lagerplatte

Da der Durchmesser der Lochkreise auf den Lagern zu groß war, um die Lager direkt auf die Träger des Gestells zu schrauben, mussten zwei Lagerplatten eingeplant werden. Diese wurden jeweils auf zwei Querträgern angeschweißt. Die Platten wurden aus 150 mm breitem und 15 mm starkem Halbzeug geschnitten, da dieses bei der Firma Werfring lagernd war. Die Länge der Platten beträgt 300 mm, da so die Querträger weiter auseinander platziert werden konnten und damit die Montagearbeiten an der gesamten Anlage vereinfacht wurden.

An den Platten wurden jeweils fünf Bohrungen durchgeführt; eine mit einem Durchmesser von ∅ 38 mm für die Welle und ein Bohrbild mit vier Bohrungen für die Montage der Lager. Dies kann man in Abbildung 23 sehen. Bei diesen Bohrungen musste mit höchster Genauigkeit gearbeitet werden, damit die beiden Bohrungen für die Welle exakt übereinander liegen.

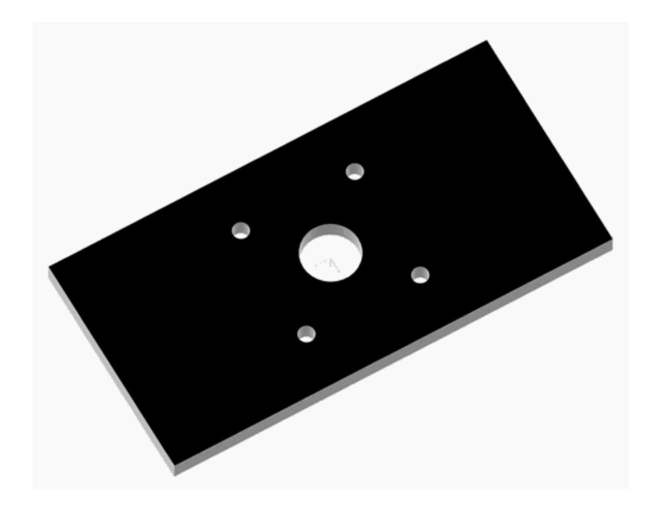


Abb. 23 ProE Zeichnung der Lagerplatten

Gestell

Durch Unebenheiten, Pflanzen und andere Hindernisse wird der Wind in Bodennähe stark gebremst. Aus diesem Grund war es erforderlich, ein Gestell zu entwerfen. Je höher der Rotor liegt, desto besser, jedoch bedeutet ein höheres Gestell auch höhere Kosten. Ein Kompromiss zwischen Kosten und Windstärke brachte das Ergebnis von einem 1500 mm hohen Gestell. Bei der Materialauswahl mussten wir uns wieder nach dem Lagerbestand unseres Hauptsponsors richten. Für das Gestell wurde 50 x 50 x 3 mm Halbzeug aus S235JR verwendet.

Die Grundfläche des Gestells ist quadratisch und da zunächst Windleitschaufeln mit eingeplant waren, musste das Gestell in ProE verkleinert werden. Nach dieser Einsparung betrug die Breite des Gestells 1000 mm.

Das Gestell besteht aus drei horizontalen Ebenen. Die erste trägt das Axiallager direkt unter dem Rotor. Dazu wurden zwei zusätzliche Träger benötigt. Für die zweite Ebene, die das Radiallager beinhaltet, wurden sechs zusätzliche Träger eingeplant, da die zwei Querträger, auf denen die Lagerplatte liegt, insgesamt vier vertikale Stützen brauchen. Die letzte Ebene bildet die Basis für diese Stützen und gleichzeitig die Stabilisierung der Beine und benötigt vier Träger. Mit den vier Stützbeinen und einem Träger für die Ummantelung macht das insgesamt 21 Komponenten, aus denen das Gestell besteht. Die gesamte Konstruktion des Gestells ist in Abbildung 24 ersichtlich.

Die Träger werden miteinander verschweißt. Da der Eckstoß weniger belastbar ist, als der T-Stoß [vgl. RMME2001 Abb.6-10], werden an den Eckpunkten Gehrungen geschnitten. Diese ermöglichen es, die auftretenden Kräfte besser zu übertragen.

Nach dem Zusammenschweißen der Komponenten wurden noch höhenverstellbare Füße angebracht, um Unebenheiten im Boden ausgleichen zu können und eine waagrechte Position im natürlichen Gelände zu garantieren.

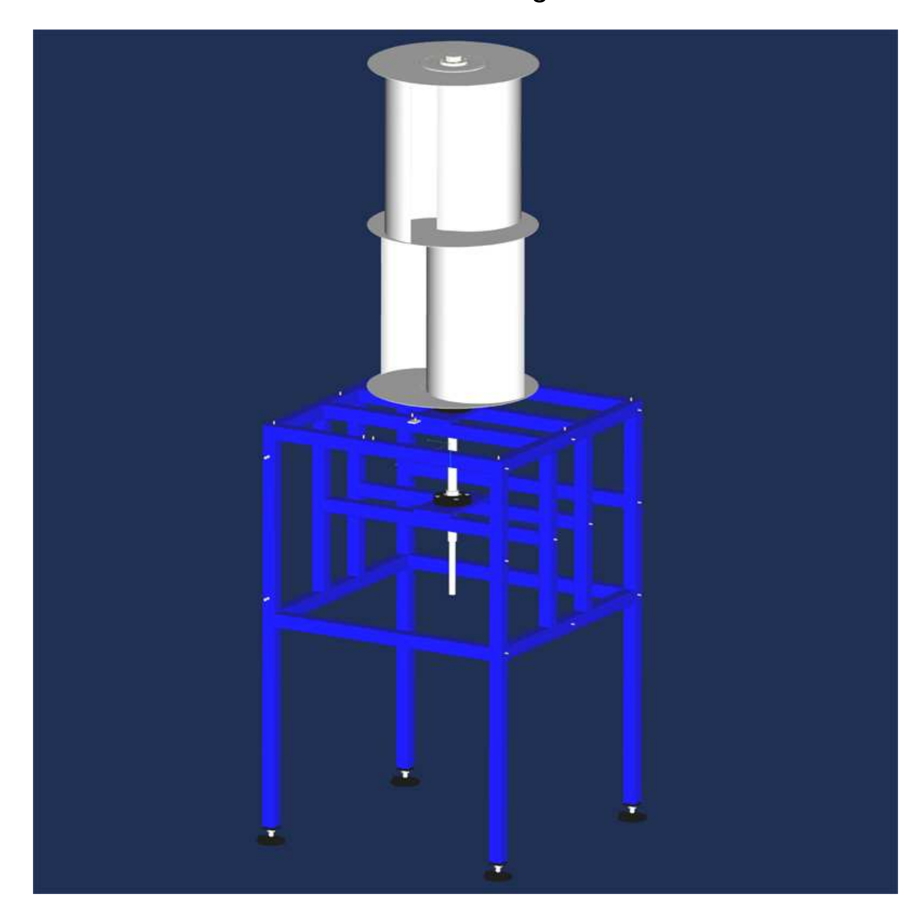


Abb. 24 Die gesamte Anlage in ProE gezeichnet

4.1.3 Generator

Der gewählte Gleichstrommotor stammt von der Firma Minimotor und liefert maximal 24V mit 2,5A. Es wurde ein Stirnradgetriebe als Übersetzung im Motor verwendet um auf die benötigten Drehzahlen zur Energieerzeugung zu gelangen. Bei der exakten Motorwahl mussten mehrere Aspekte beachtet werden, daher wurde Beratung von Professoren und dem Motorlieferanten, der Firma Spörk, eingeholt. Die Ausgangsdrehzahl nach dem Getriebe des Motors musste dem Rotor entsprechend niedrig sein, weiters musste man die spätere Belastung durch die Ladung der 24V Batterie mit einrechnen.

Die Daten des eingebauten Motors befinden sich im Minimotor-Datenblatt im Anhang H. Den Überblick über die wichtigsten Parameter liefert die folgende Tabelle:

Übersetzungsverhältnis	42,6
Type	ACC24MP
Spannung	24 V
Strom	2,5 A
Aufgenommene Leistung	60 W
Eingangsdrehzahl	2800 min^{-1}
Ausgangsdrehzahl	66 min^{-1}
Nennmoment	5 Nm

Tab. 4 Motorkenndaten

Der Motor wurde in Absprache mit dem Motorlieferanten und dem Hauptsponsor gewählt. Wie die Tests ergeben haben, kann ein zu leistungsstarker Motor vom Savoniusrotor nur bei hohen Windgeschwindigkeiten brauchbar betrieben werden. Für eine regelmäßige Energieerzeugung mit dem Windrad, ist es sinnvoller bei durchschnittlichen Windstärken einen passenden Ladestrom zu erzeugen. Der gewählte Motor ist daher eher leistungsschwach, garantiert dadurch aber ein Anlaufen des Rotors bei geringen Windgeschwindigkeiten und kann bis ca. 80 km/h Windstärke effektiv Energie liefern.

Für die Elektronik spielte weiters vor allem der Maximalstrom des Motors eine Rolle. Wenn man beim Gleichstrommotor als Generator eine höhere Drehzahl an der Motorwelle erzeugen kann, als von den Motordaten vorgegeben, versucht der Motor auch die höhere Energie zu erzeugen. Das heißt, es wird mehr Energie erzeugt, als der Motor eigentlich aushält, des Weiteren wird dieser daher bald kaputt. Wird beim Motor über längere Dauer die Maximalleistung, z.B. auf Grund von Sturm überschritten, wird der Gleichstrommotor überlastet, überhitzt und zerstört. Mittels PIC konnte der entsprechende Eingangstrom der Schaltung dauernd gemessen werden und eine Dauerüberlastung durch die Regelung verhindert werden. Als weiteren Schutz kann ein Bremswiderstand eine gezielte Bremsung des Rotors durchführen.

Der gewählte Generator hat eine elektrische Leistung von 60 Watt. Da ein sehr hohes Übersetzungsverhältnis gewählt wurde, gibt es im Getriebe auch hohe Verluste. Die Getriebeverluste belaufen sich auf 40 Watt und müssen natürlich im Wirkungsgrad berücksichtigt werden.

Die folgende Tabelle zeigt, die im Wind vorhandene Energie und die maximal zu erzeugende elektrische Leistung des Savoniusrotors, bei 8% Gesamtwirkungsgrad.

Windgeschwindigkeit	Windleistung	Nutzleistung
1 m/s	0,43 W	0,03 W
2 m/s	3,47 W	0,28 W
3 m/s	11,71 W	0,94 W
4 m/s	27,76 W	2,22 W
5 m/s	54,23 W	4,34 W
6 m/s	93,70 W	7,50 W
7 m/s	148,79 W	11,90 W
8 m/s	222,11 W	17,77 W
9 m/s	316,24 W	25,30 W
10 m/s	433,80 W	34,70 W
11 m/s	577,39 W	46,19 W
12 m/s	749,61 W	59,97 W

Tab. 5 elektrische Nutzleistung mit Generator

Die Formel der Windleistung wurde bereits im Kapitel 2.3.1 erklärt:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot {v_1}^3 \cdot A$$

Um auf die Nutzleistung zu kommen wird die Windleistung mit dem Gesamtwirkungsgrad, welcher 8% beträgt, multipliziert.

4.2. Berechnung

4.2.1 Strömungswiderstand

Für die Berechnungen am Savoniusrotor wurde der Extremfall („worst-case“) angenommen. Die Windgeschwindigkeit wurde mit 30 m/s (108 km/h) angenommen, was laut der Windstärkentabelle nach Beaufort eine Windstärke von 12 bedeutet und schwere Verwüstungen verursacht [vgl. GROT1978 S. 9].

Außerdem wird angenommen der Wind auf eine nicht drehbare Fläche bläst, die der projizierten Fläche des Rotors entspricht (siehe Abbildung 25).

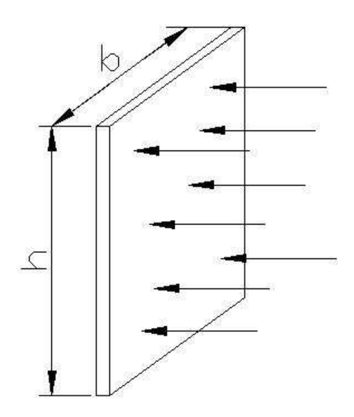
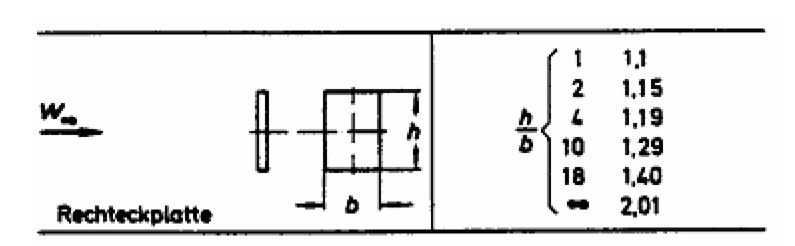


Abb. 25 Wind bläst auf die projizierte Fläche des Rotors

Die Kraft F_W ist die Kraft, die der Rotor dem Wind entgegensetzt:

$$F_W = c_W \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v_W{}^2$$

c_W ist der Luftwiderstandsbeiwert, der sich aus Form und Größe der angeblasenen Fläche ergibt, und kann der Abbildung 26 entnommen werden.



Rechteckplatte	h/b	c_W
	1	1,1
	2	1,15
	4	1,19
	10	1,29
	18	1,40
	∞	2,01

Abb. 26 Luftwiderstandsbeiwert bei rechteckiger Fläche;

Betrachtet man die rechte Spalte:

Links das Verhältnis von h zu b, rechts der dazugehörige c_W- Wert

$$Höhe\ Rotor = h = 1200mm$$

$$Breite\ Rotor = b = 600mm$$

$$\frac{h}{b} = \frac{1200mm}{600mm} = 2$$

Das Höhen-Breiten Verhältnis wird nun in Abbildung 26 gesucht und es ergibt sich folgender c_W Wert.

$$\Rightarrow c_W = 1{,}15$$

Die Luftdichte ρ bei 20 ℃ und 1 bar beträgt 1,205 kg/m³. Aus diesen Werten ergibt sich für den Strömungswiderstand folgende Berechnung:

$$F_W = 1{,}15 \cdot \frac{1{,}205 \frac{kg}{m^3}}{2} \cdot 1{,}2m \cdot 0{,}6m \cdot \left(30 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$F_W = 448N$$

4.2.2 Lagerberechnung

Um das System besser darstellen zu können, wurde es in Abbildung 27 um 90° gekippt dargestellt.

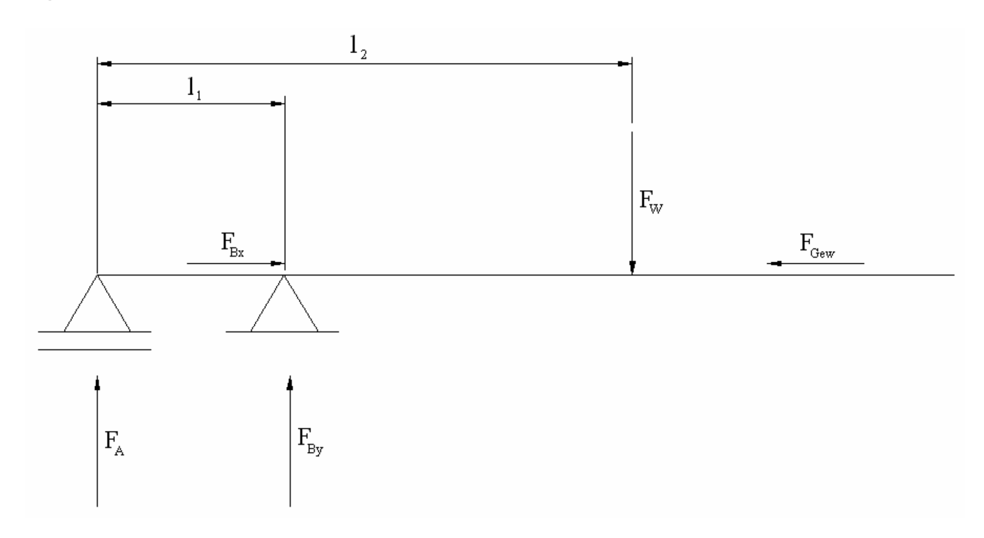


Abb. 27 Einwirkung des Windes, der Gewichtskraft und die Auflagerreaktionen.

l_1 = 350 mm

l_2 = 993 mm (von Lager A bis zur Mitte des Rotors)

Die Dichte ρ des für den Rotor zu verwendenden Materials X5CrNi 18-10 1.4301 beträgt 7,9 kg/dm³.

Die Masse der Welle ist daher:

$$V = (r_1^2 \cdot \pi \cdot l_1) + (r_2^2 \cdot \pi \cdot l_2) + (r_3^2 \cdot \pi \cdot l_3)$$
$$V = [(0{,}2dm)^2 \cdot \pi \cdot 12{,}74dm] + [(0{,}175dm)^2 \cdot \pi \cdot 5{,}4dm] + [(0{,}125dm)^2 \cdot \pi \cdot 2dm]$$
$$V = 1{,}6dm^3 + 0{,}52dm^3 + 0{,}098dm^3$$
$$V = 2{,}218dm^3$$
$$m = V \cdot \rho = 2{,}218dm^3 \cdot 7{,}9\frac{kg}{dm^3}$$
$$m = 17{,}528kg$$

Die Masse des Rotors ergibt sich aus folgender Berechnung:

$$V_{ges} = V_{Rotorblatt} \cdot 4 + V_{Teller} \cdot 3 + V_{Scheibe} \cdot 2$$
$$V_{Rotorblatt} = 6dm \cdot 5{,}65dm \cdot 0{,}0125dm = 0{,}42375dm^3$$
$$V_{Teller} = (3{,}1dm)^2 \cdot \pi \cdot 0{,}02dm = 0{,}6dm^3$$
$$V_{Scheibe} = (1{,}225dm)^2 \cdot \pi \cdot 0{,}03dm = 0{,}14143dm^3$$
$$V_{Stellring} \approx 0{,}02dm^3$$
$$V_{ges} = 0{,}42375dm^3 \cdot 4 + 0{,}6dm^3 \cdot 3 + 0{,}14143dm^3 \cdot 2$$
$$V_{ges} = 3{,}77786dm^3$$
$$m = V \cdot \rho = 3{,}77786dm^3 \cdot 7{,}9\frac{kg}{dm^3}$$
$$m = 29{,}845kg$$

Die Masse von Rotor und Welle beträgt somit rund 47 kg:

$$F_{Gew} = m \cdot g = 47kg \cdot 9{,}81\frac{m}{s^2}$$
$$F_{Gew} = 461{,}07N$$

Die Gleichgewichtsbedingungen für dieses System lauten:

$$\sum F_y = 0 = F_W - F_{By} - F_A$$
$$\sum F_x = 0 = F_{Gew} - F_{Bx}$$
$$\sum M = 0 = F_{By} \cdot l_1 - F_W \cdot l_2$$

Für F_{By} wird ein neuer Ausdruck gesucht, um ihn in die Gleichgewichtsbedingung der Momente einsetzen zu können und es so möglich ist, F_A zu bestimmen. Dies zeigt folgende Berechnung:

$$F_{By} = F_W - F_A$$
$$(F_W - F_A) \cdot l_1 - F_W \cdot l_2 = 0$$
$$F_W \cdot l_1 - F_A \cdot l_1 - F_W \cdot l_2 = 0$$
$$F_W \cdot l_1 - F_W \cdot l_2 = F_A \cdot l_1$$
$$F_A = \frac{F_W \cdot l_1 - F_W \cdot l_2}{l_1}$$
$$F_A = \frac{447{,}1N \cdot 350mm - 447{,}1N \cdot 993mm}{350mm}$$
$$F_A = 821{,}4N$$

Mit der Gleichgewichtsbedingung der Kräfte in Y-Richtung kann nun F_{By} berechnet werden:

$$F_{By} = F_W - F_A$$
$$F_{By} = 447{,}1N - (-821{,}4N)$$
$$F_{By} = 1268{,}5N$$

Da in x-Richtung nur die Gewichtskraft das Lager B belastet, entspricht F_{Bx} der Gewichtskraft.

Lebensdauer

Für die Lebensdauer des Lagers wurden folgende Berechnungen ausgeführt:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$
$$L_{10h} = \frac{10^6 \cdot L_{10}}{60 \cdot n}$$

L_{10} und L_{10h} heißen nominelle Lebensdauer und haben die Einheiten 10^6 Umdrehungen beziehungsweise Stunden h. L_{10} gibt an wie viele Umdrehungen das Lager mindestens überlebt, L_{10h} gibt die entsprechende Stundenanzahl an. C ist die lagerspezifische dynamische Tragzahl und entspricht in diesem Fall 15 kN [siehe Anhang H]. P heißt dynamische äquivalente Lagerbelastung und ist die zuvor berechnete Lagerbelastung, p ist der Lebensdauerexponent, der für Kugellager 3 lautet [vgl. RMME2001 S.475]

Für die Drehzahl wurde als Richtwert die Drehzahl des Modells gewählt.

Lebensdauer für das Lager A:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{F_A}\right)^p = \left(\frac{15kN}{0{,}82kN}\right)^3$$

$$L_{10} = 6089 \cdot 10^6 Umdrehungen$$

$$L_{10h} = \frac{10^6 \cdot L_{10}}{60 \cdot n} = \frac{10^6 \cdot 6089h}{60 \cdot 432\min^{-1}}$$

$$L_{10h} = 234950h$$

Lebensdauer für das Lager B:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{F_{By}}\right)^p = \left(\frac{15kN}{1{,}27kN}\right)^3$$

$$L_{10} = 1654 \cdot 10^6 Umdrehungen$$

$$L_{10h} = \frac{10^6 \cdot L_{10}}{60 \cdot n} = \frac{10^6 \cdot 63786h}{60 \cdot 432\min^{-1}}$$

$$L_{10h} = 63792h$$

4.2.3 Festigkeitsberechnungen

Ermittlung des erforderlichen Querschnitts für die Welle:

In Abbildung 28 ist zu erkennen, wie die Welle belastet wird, Abbildung 29 zeigt den Momentenverlauf.

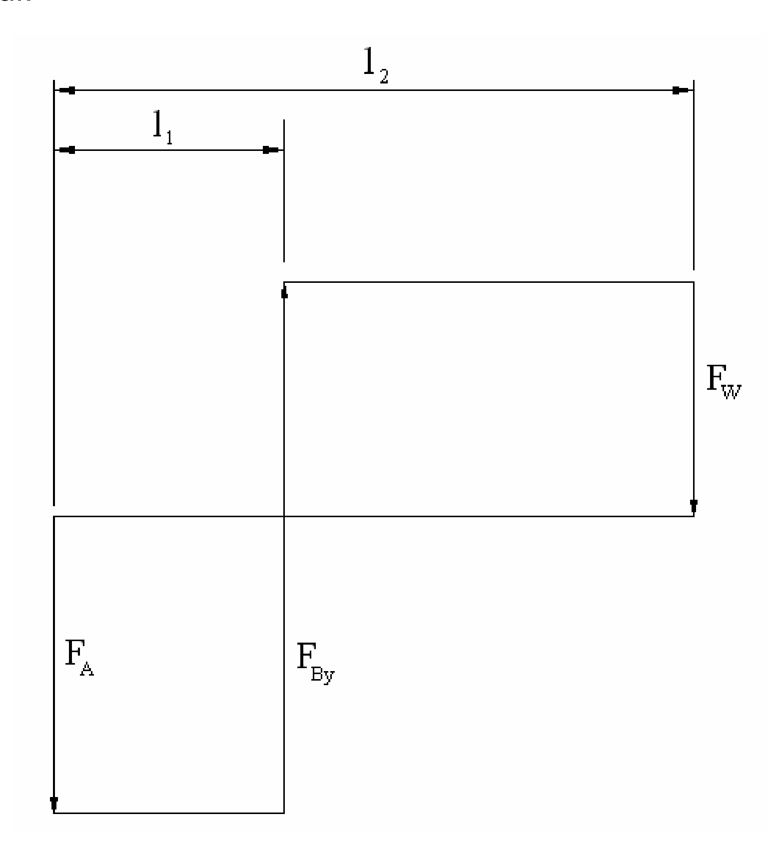


Abb. 28 Kräfteverlauf auf dem belasteten Wellenstück

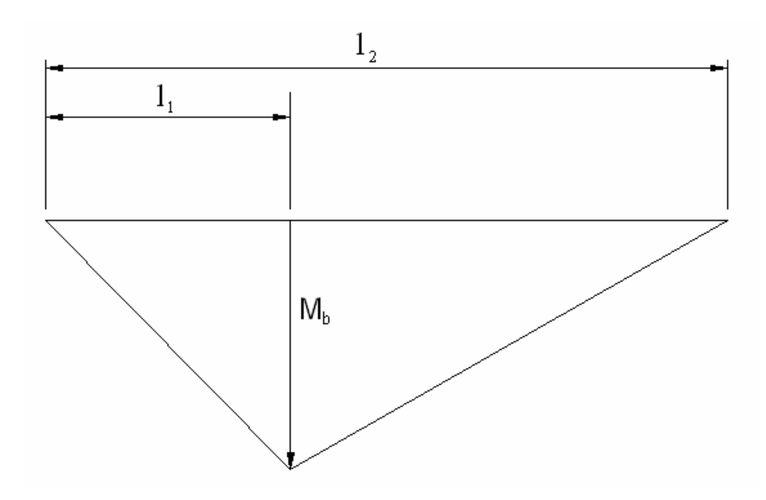


Abb. 29 Momentenverlauf auf dem belasteten Wellenstück

Daraus ergibt sich folgende Berechnung für das Biegemoment:

$$M_B = F_W \cdot (l_2 - l_1) = F_A \cdot l_1$$
$$M_B = 447{,}1N \cdot (993mm - 350mm)$$
$$M_B = 287498{,}16Nmm = 287{,}5Nm$$

Die zulässige Biegespannung σ_b muss kleiner sein als Grenzspannung σ_{zul}, die für jedes Material festgelegt ist, dividiert durch eine Sicherheit S. Die Sicherheit wurde mit 1,5 gewählt, die zulässige Spannung beträgt 250 N/mm² [vgl. RMTB2001 S. 4].

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_{Grenz}}{S} = \frac{250 \frac{N}{mm^2}}{1{,}5}$$
$$\sigma_{zul} = 166{,}67 \frac{N}{mm^2}$$

Berechnung des Wellendurchmessers:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{b\max}}{W_x} \leq \sigma_{zul}$$
$$W_x \geq \frac{M_{b\max}}{\sigma_{zul}}$$
$$W_x = \frac{d^3 \cdot \pi}{32}$$
$$\frac{d^3 \cdot \pi}{32} \geq \frac{M_{b\max}}{\sigma_{zul}}$$
$$d \geq \sqrt[3]{32 \cdot \frac{M_{b\max}}{\sigma_{zul} \cdot \pi}}$$
$$d \geq \sqrt[3]{32 \cdot \frac{287498{,}16Nmm}{166{,}67 \frac{N}{mm^2} \cdot \pi}}$$
$$d \geq 26mm$$

Beim Massenträgheitsmoment kommt es darauf an, wie weit die Masse von der Drehachse entfernt liegt. Da die Welle direkt auf der Drehachse liegt, konnte sie ohne Probleme stärker geplant werden als laut Berechnungen nötig wäre. Lager mit dem Durchmesser ∅ 35 mm sind bei der Firma Werfring Standard. Damit nicht extra andere Lager bestellt werden mussten, wurden daher diese Lagerungen verwendet. Das Axiallager benötigt jedoch eine Schulter auf der Welle, welche auf dem Lager aufsitzt. Deshalb sollte die Welle beim Rotor einen Durchmesser von ∅ 40 mm haben.

Der Querschnitt des Luftkanals zwischen den Flügeln wird durch die Welle zwar verringert, doch hat sich herausgestellt, dass dies im praktischen Betrieb nicht leistungsmindernd wirkt [SCHU2005 S.11].

Welle: Verformung

Die Welle wird ähnlich wie in Abbildung 30 belastet. Zwar ist beim „Savoniusrotor Oben Ohne“ A das Loslager und B das Festlager, allerdings hat dieser Umstand nur geringen Einfluss auf die Berechnungen

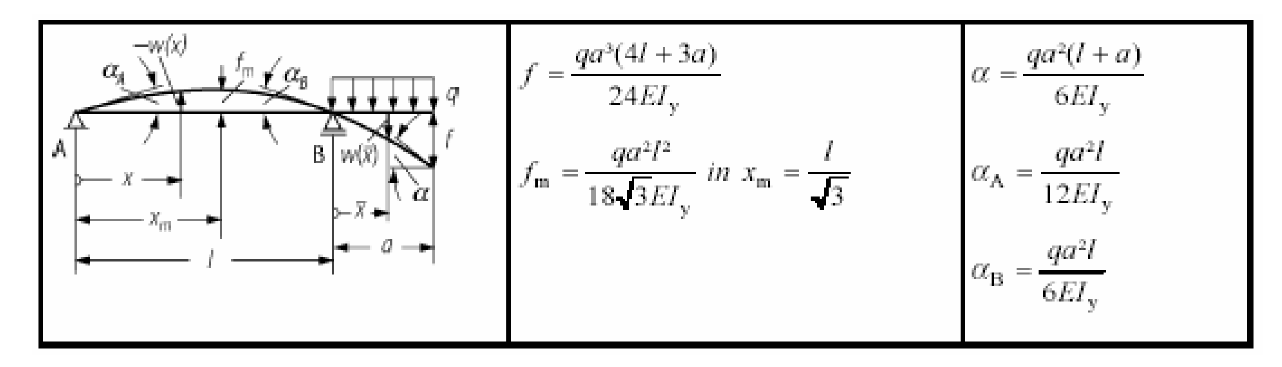


Abb. 30 Belastungsfall der Welle

$$f = \frac{q \cdot a^3 \cdot (4 \cdot l + 3a)}{24 \cdot E \cdot I_y}$$

$$q = \frac{F_W}{a}$$

$$q = \frac{447,1N}{1200mm}$$

$$q = 0,3726\frac{N}{mm}$$

$$I_y = \frac{r^4 \cdot \pi}{4}$$

$$I_y = \frac{(20mm)^4 \cdot \pi}{4}$$

$$I_y = 125663,71mm^4$$

Das Elastizitätsmodul von X5CrNi18-10 beträgt 210000 N/mm² [vgl. RMTB2001 S. 1].

$$f = \frac{0,3726\frac{N}{mm} \cdot (1200mm)^3 \cdot (4 \cdot 350mm + 3 \cdot 1200mm)}{24 \cdot 210000\frac{N}{mm^2} \cdot 125663,71mm^4}$$

$$f = 5,083mm$$

Bei 30 m/s Windgeschwindigkeit verformt sich die Welle am oberen Ende um ungefähr 5 mm.

$$\alpha = \frac{q \cdot a^2 \cdot (l+a)}{6 \cdot E \cdot I_y}$$

$$\alpha = \frac{0{,}3726 \frac{N}{mm} \cdot (1200mm)^2 \cdot (350mm + 1200mm)}{6 \cdot 210000 \frac{N}{mm^2} \cdot 125663{,}71mm^4}$$

$$\alpha = 0{,}00525°$$

$\tan \alpha_{zul} = 10 \cdot 10^{-4}$ [vgl. RMTB2001 S. 108]

$$\tan \alpha_{zul} \geq \tan \alpha$$

$$10 \cdot 10^{-4} \geq 9{,}17 \cdot 10^{-5}$$

Die Verformung ist somit zulässig.

Gestell: Schweißnahtberechnung

Bei Querschnitten mit Dicken $t \geq 3$ mm müssen folgende Bedingungen für die Schweißnahtdicke a eingehalten werden (gilt nur für Kehlnähte):

$$2mm \leq a \leq 0{,}7 \cdot t$$

$$a \geq \sqrt{t} - 0{,}5mm$$

[vgl. RolM.2001 Glg.6.16]

t entspricht der Wandstärke der Formrohre und ist somit 3 mm.

$$2mm \leq a \leq 0{,}7 \cdot 3mm$$

$$2mm \leq a \leq 2{,}1mm$$

$$a \geq \sqrt{3mm} - 0{,}5mm$$

$$a \geq 1{,}232mm$$

$$a \approx 2mm$$

Die Länge l der Schweißnähte beträgt 50 mm.

Um einen Festigkeitsnachweis zu erbringen wird ein hoch belasteter Träger gewählt. Die Schweißnähte der Querträger des Axiallagers sollen untersucht werden. Über die Lagerplatte wird die Gewichtskraft des Rotors (461,07 N) auf die zwei Querträger

aufgeteilt. Da die Träger auf beiden Enden verschweißt sind wirkt auf einer Seite nur noch $F_G/4$.

Laut [RMTB2001 Tabelle 6-6] ist die zulässige Spannung σ_{zul} für Schweißnähte bei S235JR 207 N/mm².

$$\frac{F}{A} = \frac{\frac{F_G}{4}}{a \cdot l} = \frac{\frac{431{,}07N}{4}}{2mm \cdot 50mm} = 1{,}078 \frac{N}{mm^2} \leq \sigma_{zul}$$

[vgl. RMME2001 Glg.6.18]

Da die auftretende Spannung sehr viel kleiner als die zulässige Spannung ist und im gesamten System sonst keine höheren Beanspruchungen auftreten, bestand keine Notwendigkeit weitere Festigkeitsnachweise für Schweißnähte zu erbringen.

4.2.4 Seilkraftberechnung

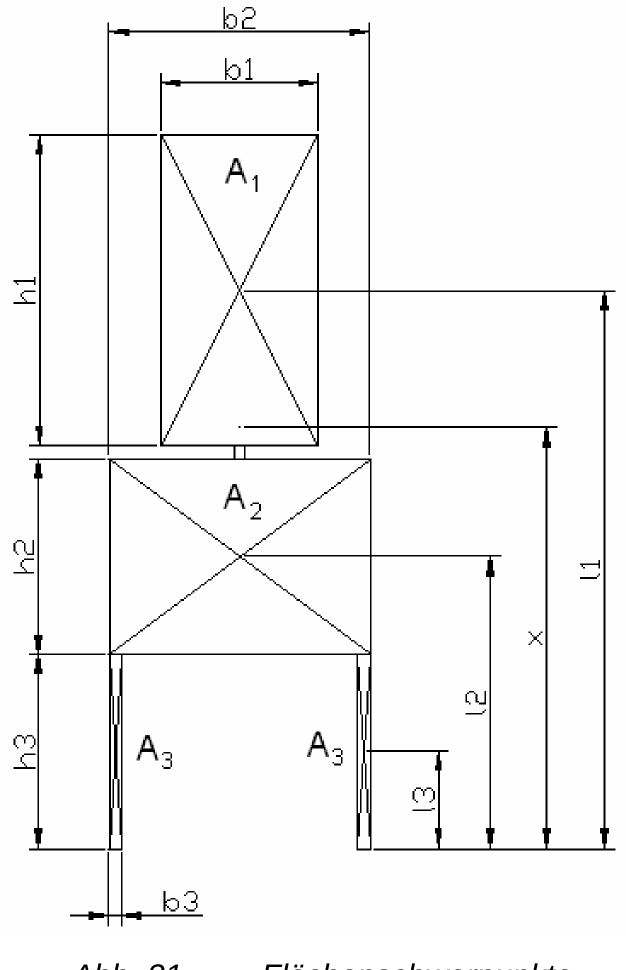


Abb. 31 Flächenschwerpunkte

Bezeichnung	Maße in mm	Beschreibung
h_1	1200	Höhe des Rotors
h_2	750	Höhe der Verkleidung
h_3	750	Halbe Höhe der Standbeine
b_1	600	Durchmesser des Rotors
b_2	1000	Breite des Gestells
b_3	50	Breite des Formrohrs
l_1	2100	Abstand von „0“ bis zum Schwerpunkt des Rotors
l_2	1125	Abstand von „0“ bis zum Schwerpunkt der Verkleidung
l_3	375	Abstand von „0“ bis zum Schwerpunkt der Standbeine
x	gesucht	Abstand von „0“ bis zum gesamten Schwerpunkt

Tab. 6 Maße des Savoniusrotors zur Bestimmung des Flächenschwerpunkts

Der Flächenschwerpunkt der gesamten Anlage ergibt sich aus den Flächenschwerpunkten der einzelnen Komponenten:

$$A_1 = h_1 \cdot b_1 = 1200mm \cdot 600mm = 720000mm^2$$
$$A_2 = h_2 \cdot b_2 = 750mm \cdot 1000mm = 750000mm^2$$
$$A_3 = h_3 \cdot b_3 = 750mm \cdot 50mm = 37500mm^2$$
$$A_{ges} = A_1 + A_2 + A_3 = 720000mm^2 + 750000mm^2 + 37500mm^2 = 1507500mm^2$$

Da der „Savoniusrotor Oben Ohne“ symmetrisch ist muss der Flächenschwerpunkt an der Mittellinie liegen. Es ist also nur der Abstand x, bezogen auf die x-Achse zu ermitteln. Dieser ist der Quotient jeder Teilfläche mal Teilschwerpunktsabstand und Gesamtfläche.

$$x = \frac{A_1 \cdot l_1 + A_2 \cdot l_2 + 2 \cdot (A_3 \cdot l_3)}{A_{ges}}$$
$$x = \frac{720000mm^2 \cdot 2100mm + 750000mm^2 \cdot 1125mm + 2 \cdot (37500mm^2 \cdot 375mm)}{1507500mm^2}$$
$$x = 1581{,}3mm$$

Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben kann der Luftwiderstandsbeiwert c_W einfach mit $\frac{h}{b}$ ermittelt werden. Mit der im selben Kapitel erklärten Formel $F_W = c_W \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v_W^2$ ließ sich die Kraft F_w, die Kraft, die der Rotor dem Wind entgegensetzt, berechnen. Die Luftdichte ρ bei 20℃ und 1 bar beträgt 1,205 kg/m³, die Windge schwindigkeit wird auch hier mit 30m/s sehr hoch angenommen.

	$\frac{h}{b}$	c_W (siehe Abb. 26)	A in m²	F_w in N
Rotor	2	1,15	0,72	448
Verkleidung	0,75	1,1	0,75	447
Standbein	15	1,36	0,0375	23

Tab. 7 Berechnung der verschiedenen F_w

Um die Kraft berechnen zu können, die im gesamten Flächenschwerpunkt wirkt, wird eine Gleichgewichtsbedingung angesetzt: die Summe aller im System auftretenden Momente muss gleich Null sein. Umgeformt ergibt sich:

$$F_{Wges} = \frac{F_{W1} \cdot l_1 + F_{W2} \cdot l_2 + 2 \cdot F_{W3} \cdot l_3}{x}$$

$$F_{Wges} = \frac{448N \cdot 2100mm + 447N \cdot 1125mm + 2 \cdot 23N \cdot 375mm}{1581{,}3mm}$$

$$F_{Wges} = 924N$$

Die Masse des „Savoniusrotors Oben Ohne“ beträgt 135 kg.

$$F_{gew} = m \cdot g = 135kg \cdot 9{,}81\frac{m}{s^2} = 1324N$$

Damit der Rotor nicht kippt muss das Moment, verursacht durch die Gewichtskraft, größer sein, als das vom Wind erzeugte Moment.

$$M_{Gew} \geq M_{Wind}$$

$$F_{Gew} \cdot \frac{b_2}{2} \geq F_{Wges} \cdot x$$

$$F_{Gew} \cdot \frac{b_2}{2} \geq \frac{\frac{\rho}{2} \cdot V_W{}^2 \cdot (c_{W1} \cdot A_1 \cdot l_1 + c_{W2} \cdot A_2 \cdot l_2 + 2 \cdot c_{W3} \cdot A_3 \cdot l_3)}{x} \cdot x$$

$$V_W \leq \sqrt{\frac{F_{Gew} \cdot \frac{b_2}{2}}{\frac{\rho}{2} \cdot (c_{W1} \cdot A_1 \cdot l_1 + c_{W2} \cdot A_2 \cdot l_2 + 2 \cdot c_{W3} \cdot A_3 \cdot l_3)}}$$

$$V_W \leq \sqrt{\frac{1324N \cdot 0{,}5m}{\frac{1{,}205kg}{2m^3} \cdot (1{,}15 \cdot 0{,}72m^2 \cdot 2{,}1m + 1{,}1 \cdot 0{,}75m^2 \cdot 1{,}125m + 2 \cdot 1{,}36 \cdot 0{,}0375m^2 \cdot 0{,}375m)}}$$

$$V_{WKipp} \leq 20{,}15\frac{m}{s}$$

Ohne Niederspannen kippt der Rotor bei einer Windgeschwindigkeit von etwa 20 m/s.

Um die Standfestigkeit auch bei höheren Windgeschwindigkeiten zu gewährleisten, wurden vier Stahlseile, die je 80 kg (also F_S=784,8N) aushalten können, zum Niederspannen verwendet.

Ab einer Windgeschwindigkeit von rund 20 m/s müssen die Stahlseile das restliche auftretende Moment aufnehmen. Da stets mindestens zwei Stahlseile in Windrichtung stehen gilt:

$$2 \cdot F_{Sx} \cdot b + 2 \cdot F_{Sy} \cdot (h_2 + h_3) = \Delta F \cdot x$$

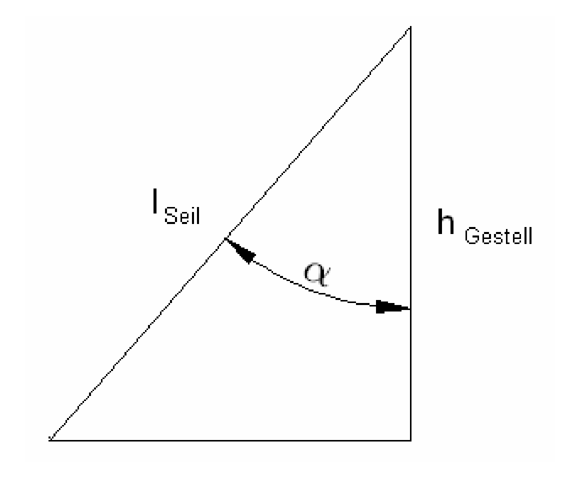


Abb. 32 Anordnung der Stahlseile

l_{Seil}=2000 mm

$h_{Gestell}$=1500 mm

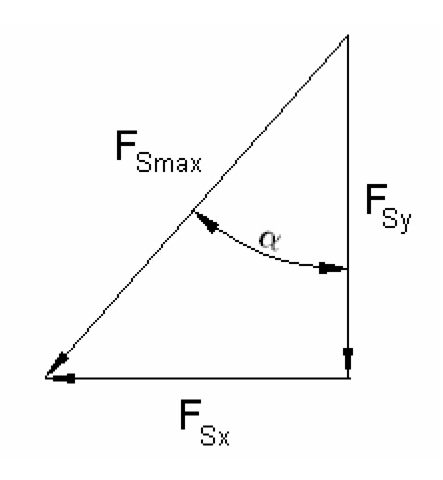


Abb. 33 Seilkraft mit Komponenten

$$\alpha = \arccos \frac{h}{l} = \arccos \frac{1500mm}{2000mm} = 41{,}41°$$

$$F_{Sy} = F_S \cdot \cos 41{,}41°$$

$$F_{Sx} = F_S \cdot \sin 41{,}41°$$

$$\Delta F = \frac{\frac{\rho}{2} \cdot (v_W{}^2 - v_{Wkipp}{}^2) \cdot (c_{W1} \cdot A_1 \cdot l_1 + c_{W2} \cdot A_2 \cdot l_2 + 2 \cdot c_{W3} \cdot A_3 \cdot l_3)}{x}$$

$$\frac{2 \cdot F_S \cdot b_2 \cdot \cos 41{,}41° + 2 \cdot \cdot F_S \cdot (h_2 + h_3) \cdot \sin 41{,}41°}{\frac{\rho}{2} \cdot (c_{W1} \cdot A_1 \cdot l_1 + c_{W2} \cdot A_2 \cdot l_2 + 2 \cdot c_{W3} \cdot A_3 \cdot l_3)} = v_W{}^2 - v_{Wkipp}{}^2$$

$$v_W = \sqrt{\frac{2 \cdot F_S \cdot b_2 \cdot \cos 41{,}41° + 2 \cdot F_S \cdot (h_2 + h_3) \cdot \sin 41{,}41°}{\frac{\rho}{2} \cdot (c_{W1} \cdot A_1 \cdot l_1 + c_{W2} \cdot A_2 \cdot l_2 + 2 \cdot c_{W3} \cdot A_3 \cdot l_3)} + v_{Wkipp}{}^2}$$

$$v_W = \sqrt{\frac{2 \cdot 784{,}8N \cdot 1m \cdot \cos 41{,}41° + 2 \cdot 784{,}8N \cdot 1{,}5m \cdot \sin 41{,}41°}{\frac{1{,}205kg}{2m^3} \cdot (1{,}15 \cdot 0{,}72m^2 \cdot 2{,}1m + 1{,}1 \cdot 0{,}75m^2 \cdot 1{,}125m + 2 \cdot 1{,}36 \cdot 0{,}0375m^2 \cdot 0{,}375m)} + \left(20{,}23\frac{m}{s}\right)^2}$$

$$v_W = 45{,}68\frac{m}{s}$$

Die Stahlseile reißen bei einer Windgeschwindigkeit von 45,68 m/s. Diese Windgeschwindigkeit verursachen bereits starke Verwüstungen an Häusern und der Umgebung.

4.2.5 Leistungsberechnung

Die Tabelle 8 zeigt die im Wind enthaltene Leistung für Windgeschwindigkeiten von 1 bis 20 m/s. Außerdem wird gezeigt, wie viel Leistung dem Wind beim angenommenen Wirkungsgrad von 16% vom Savoniusrotor entnommen werden kann.

Windgeschwindigkeit	Windleistung	Nutzleistung
1 m/s	0,43 W	0,07 W
2 m/s	3,47 W	0,56 W
3 m/s	11,71 W	1,87 W
4 m/s	27,76 W	4,44 W
5 m/s	54,23 W	8,68 W
6 m/s	93,70 W	14,99 W
7 m/s	148,79 W	23,81 W
8 m/s	222,11 W	35,54 W
9 m/s	316,24 W	50,60 W
10 m/s	433,80 W	69,41 W
11 m/s	577,39 W	92,38 W
12 m/s	749,61 W	119,94 W
13 m/s	953,06 W	152,49 W
14 m/s	1190,35 W	190,46 W
15 m/s	1464,08 W	234,25 W
16 m/s	1776,84 W	284,30 W
17 m/s	2131,26 W	341,00 W
18 m/s	2529,92 W	404,79 W
19 m/s	2975,43 W	476,07 W
20 m/s	3470,40 W	555,26 W

Tab. 8 Leistungstabelle

Die Formel zur Windleistung wurde bereits im Kapitel 2.3.1 erklärt:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1{}^3 \cdot A$$

Um die Nutzleistung berechnen zu können, wird die Windleistung mit dem Wirkungsgrad multipliziert.

4.3. Fertigung

Bei der Fertigung stand die bestens ausgestattete Werkstatt der Firma Werfring zur Verfügung.

Zum einfachen Verständnis sind die einzelnen Arbeitsschritte nicht immer in chronologischer Reihenfolge angeführt. Das kommt daher, dass öfters Maschinen besetzt waren oder Material noch nicht eingetroffen war und so an anderen Stellen weitergearbeitet wurde. Bei einer zeitlich geordneten Aufzählung der Arbeiten würde man schnell die Übersicht verlieren.

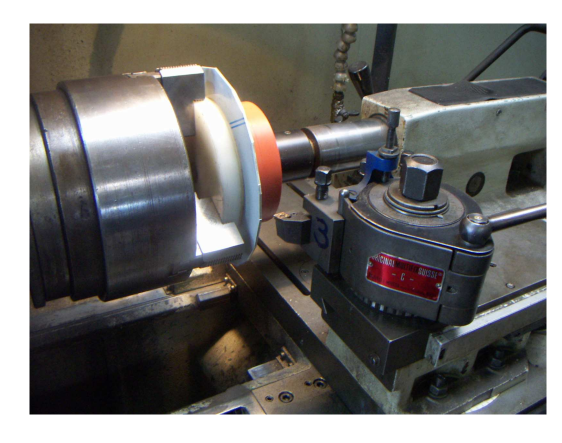
Sinnlos und nicht zweckmäßig wäre auch ein Erwähnen von Arbeiten wie Entgraten, Senken, Schweißnähte putzen oder Fasen schneiden. Diese Tätigkeiten wurden, wann immer notwendig, durchgeführt.

4.3.1 Rotor

Steifigkeitsscheiben

Zwei Blechstücke mit den Maßen 250 mm x 250 mm wurden grob, mit einer elektrischen Blechschneidemaschine, ausgeschnitten. Auf ihnen wurden die Kreise mit dem Durchmesser 245 mm mit einem Zirkel angerissen und die Bleche ungefähr auf Kreisform zugeschnitten. In der Mitte entstand ein Stanzloch mit dem Durchmesser ∅ 42 mm.

Um runde Scheiben zu erhalten, wurden diese Bleche auf einer Drehbank bearbeitet. Da die Bleche aber nur 3 mm dick waren, konnten sie nicht direkt eingespannt werden. Es musste zuerst ein Plastikzylinder bearbeitet werden, auf dem die Bleche aufgesteckt wurden und damit gemeinsam in der Drehmaschine eingespannt werden konnten. Hierzu wurde auf dem Zylinder ein 2,5 mm langer Absatz mit dem Durchmesser ∅ 42 mm gedreht, auf dem die Bleche befestigt wurden. Auf der anderen Seite sorgten ein Kunststoffzylinder und ein Rollkörner für die nötige Stabilität. Die Spannvorrichtung ist in Abbildung 34 und 35 zu sehen. Nachdem durch das Drehen runde Scheiben entstanden waren, wurde das Bohrbild gefertigt.



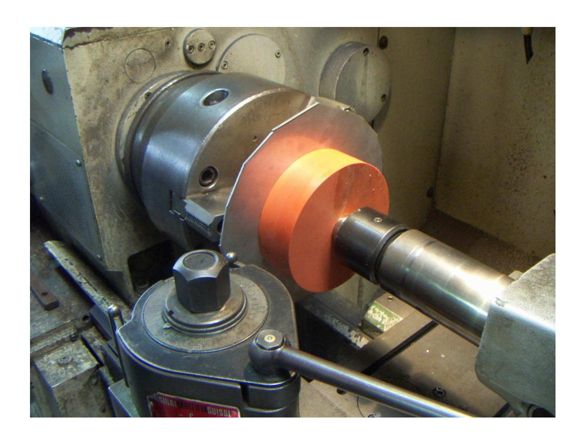


Abb. 34 und 35 Bearbeitung der Steifigkeitscheiben

Teller

Die Teller sollten, wie die Steifigkeitsscheiben, an der Drehbank gefertigt werden. Allerdings war der Abstand zwischen Spannfuttermittelpunkt und Führung des Werkzeugschlittens zu gering. Deshalb wurden die drei Scheiben mit einem Plasmaschneider (siehe Abbildung 36 und 37) bei 60 A aus einem großen Blechstück ausgeschnitten. Der Plasmaschneider wurde durch ein Gestänge mit einer zuvor angefertigten Bohrung im Mittelpunkt der Scheibe verbunden. Wichtig bei der Fertigung war, exakt runde Scheiben zu erhalten, da anderenfalls der Rotor unrund laufen würde.





Abb. 36 und 37 Plasmaschneider und Gestänge

Das Stanzwerkzeug hat an der Unterseite eine Spitze, mit der man mithilfe eines Körnerpunktes exakt in die Mitte des zu stanzenden Loches treffen kann. Da aber wegen des Plasmaschneidens bereits eine Bohrung vorhanden war, konnte der Mittelpunkt nicht mehr gekörnt werden. Als Lösung wurde ein Klebeband über das Loch geklebt und so der Mittelpunkt erneut angerissen. Erwartungsgemäß war dieser Weg aber nicht ganz genau, was auch später für Probleme sorgte.

Auch hier wurde am Schluss das Bohrbild zur Verbindung von Teller, Steifigkeitsscheiben und Flanschplatten angefertigt.

Flanschplatten mit Stellring

Da entgegen aller Erwartungen kein Einzelteil, das Flanschplatte und Stellring kombiniert, zur Verfügung stand, musste dieser erst gefertigt werden. Hierzu wurden zwei Wasserrohrflanschplatten aus Restbeständen und zwei Stellringe, mit je zwei Wurmschrauben, jeweils mit Innendurchmesser ∅ 40 mm, verschweißt. Da diese Schweißnähte nur gering belastet werden, wurde, ohne vorhergehende Berechnungen, beschlossen, die beiden Teile nur durch einige wenige kurze Nähte zu verbinden.

Die zwei schon vorgefertigten verwendeten Flanschplatten wiesen ein stark asymmetrisches Bohrbild auf, welches aber die Funktionsweise nicht beeinflusste.

Rotorblätter

Gleich beim Zuschneiden der Rotorblätter unterlief ein Fehler. Die Bleche wurden genau nach Plan abgeschnitten. Weil aber beim Biegen in der automatischen Walze (siehe Abbildung 38), nicht die gesamte Länge des Bleches gebogen werden kann, mussten auf jeder Seite ungefähr 150 mm dazugerechnet werden. Deshalb wurden neue Bleche zugeschnitten, die 300 mm länger waren.



Abb. 38 Biegen der Rotorbleche an der automatischen Walze

Beim Biegen gab es das Problem, dass man nur in kleinen Schritten zustellen konnte, da man sonst die Bleche nicht mehr in die Walzen einführen konnte. So war die Arbeit an den vier Blechen sehr langwierig.

Nachdem die Rotorblätter gebogen waren, wurden die überschüssigen 150 mm auf jeder Seite der vier Bleche mit einem Winkelschleifer abgetrennt.

4.3.2 Welle

Zunächst war geplant, die Welle aus einem Stück zu drehen. Vor Ort wurde uns aber bewusst, dass es mit den verfügbaren Maschinen nicht möglich war, eine so lange Welle anzufertigen, beziehungsweise zu bearbeiten. Aus diesem Grund sollte die Welle aus zwei Teilen bestehen: die Welle mit dem Durchmesser ∅ 40 mm, mit welcher der Rotor verschraubt wurde und die Welle mit dem Absatz, auf die der Generator angebracht wurde.

Die erste Idee bestand darin, die Wellen durch Innengewinde an den beiden Wellen und eine Gewindestange zusammenzuschrauben. Dieser Lösungsweg hätte den Vorteil gehabt, dass die Welle teilbar und somit leichter transportierbar gewesen wäre. Allerdings wurde befürchtet, dass durch das Gewindespiel ein unrundes Laufen der Welle verursacht werden könnte.

Der nächste Lösungsansatz war, die Wellen mit einer Passung zusammen zustecken und mit jeweils einer Wurmschraube pro Seite zu verschrauben. Dazu wurden zunächst die beiden Wellen gefertigt, wobei auch Zentrierbohrungen für den Rollkörner angefertigt werden mussten. Der Einsatz des Rollkörners war bei den noch immer langen Wellen unbedingt nötig.

Zunächst wurden 35 mm lange Bohrungen mit dem Durchmesser ∅ 15,5 mm vorgearbeitet und danach die Passungen ∅ 16F8 mit einer Reibahle gefertigt.

Der Bolzen, welcher die beiden Wellen verbindet, wurde auf die Passung ∅ 16h9 und auf die Länge 60 mm gedreht. Auf der ganzen Länge wurde er auf einer Breite von ungefähr 3 mm geschliffen, damit die Luft beim Einschlagen ausströmen kann.

Nachdem die Bohrungen und Gewinde für die beiden Wurmschrauben an einer Fräsmaschine fertig gestellt wurden, wurde der Bolzen zur zusätzlichen Sicherheit in beiden Wellen mit Metallkleber geklebt.

Obwohl eine Passung verwendet wurde, war nach dem Verbinden der Wellen noch immer so viel Spiel vorhanden, dass die Welle durch den einseitigen Druck, verursacht durch die Wurmschrauben, einen leichten Knick erhielt. Eine Lösung für dieses Problem wäre gewesen, weitere Wurmschrauben in die Welle zu treiben.

Es wurde aber beschlossen, auf die Vorzüge einer teilbaren Welle zu verzichten und lieber die Stabilität zu fördern. Deshalb sollten die beiden Wellen verschweißt werden.

Da auf die Welle mehr Kräfte als auf die Flanschplatte wirken, wurde hier eine durchgehende Naht geschweißt.

Durch das Schweißen verzog sich die Welle um einige wenige Zehntel Millimeter, die sich aber stark auf das Drehverhalten des Rotors ausgewirkt hätten, wäre dieser Verzug nicht behoben worden. Deshalb wurde die Welle in der Drehbank mit sehr kleiner Drehzahl gedreht, mit einem Zentriertaster vermessen und gegebenenfalls Unrundheiten mit einer Spindelpresse korrigiert. Dieser Vorgang musste mehrere Male wiederholt werden.

Das Gewicht der Welle betrug nun 17,5 kg.



Abb. 39 Die verwendete Messuhr

4.3.3 Gestell

Lagerplatte

Aus einem 15 mm dicken und 150 mm breiten Rohling wurden zwei 300 mm lange Stücke geschnitten. Dabei handelte es sich um den Werkstoff S235JR, nicht weil dieser besondere Eigenschaften aufweist, sondern weil er sofort verfügbar war. Das genaue Einhalten der Maße 15 x 150 x 300 war nicht weiter wichtig, da diese Abmessungen die Funktionsweise nicht beeinflussen.

Das Bohrbild sollte an einer Fräsmaschine gefertigt werden, da hier eine hohe Genauigkeit erzielt werden kann. Um bei der Montage eine genaue Überlagerung der beiden ∅ 42 mm Bohrungen in den Mitten der Platten erreichen zu können, wurde der Ausgangspunkt (Null-Punkt) für alle Bohrungen in der linken oberen Ecke gewählt. Auch bei der Montage musste man sich an diesen Punkten orientieren. Wären die

beiden Bohrungen für die Welle nicht exakt übereinander angebracht werden, hätte sich der Rotor womöglich nicht gedreht.

Nach der Montage der Lager wurde die Welle eingeführt. Da sich diese aber nur sehr schwer drehen ließen und die beiden Lager aus nicht rostendem Stahl gefertigt sind (siehe Anhang H), wurden die Simmerringe an Unter- und Oberseite der Lager entfernt. Dadurch ließ sich die Welle erheblich leichter drehen.

Gestell

Zunächst wurden alle 21 Teile aus 50 x 50 x 3 mm Halbzeug mit einer Bandsäge zugeschnitten (siehe Abbildungen 40 und 41). Die Gehrungen der zuzuschneidenden Teile wurden ebenfalls an der Bandsäge gefertigt.

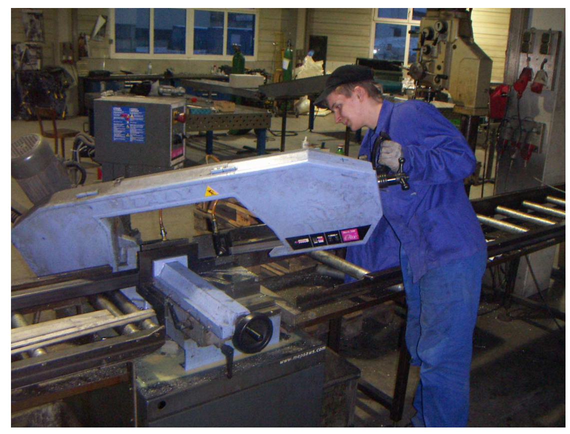




Abb. 40 und 41 Zuschneiden des Gestells an der Bandsäge

Beim Verschweißen der Formrohre musste sehr genau darauf geachtet werden, dass die einzelnen Teile im rechten Winkel zueinander standen. Aus diesem Grund wurde intensiv mit Anschlagwinkeln und Haarwinkeln gearbeitet. Waren die Rohre in ihren richtigen Positionen, wurden sie zunächst geheftet, erneut ausgerichtet und erst dann rundum mit 140 A verschweißt. Diese Arbeit war sehr zeitintensiv und musste immer zu zweit durchgeführt werden. Nach Beendigung dieser Arbeit wurden noch die Füße in die Stützen eingeschlagen.



Abb. 42 Die drei Fertigungsstufen des Gestells

Bei Fertigstellung des Gestells wurde bemerkt, dass sich die Stützen durch das Schweißen etwas verzogen hatten. Um das zu korrigieren, wurden mit einer Winde jeweils zwei Stützen auseinander gedrückt (siehe Abbildung 43 auf folgender Seite).



Abb. 43 Auseinanderbiegen der Stützen mit Hilfe der Winde

Als Letztes wurden die Lagerplatten angeheftet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Null-Punkte und somit auch die Bohrungen exakt übereinander lagen. Dass die Platten genau in der Mitte des Gestells lagen, war für die Funktionalität des Rotors nicht wichtig.

4.3.4 Montage

Nachdem Teller und Steifigkeitsscheiben verschraubt worden waren, konnten die Flanschplatten mit Stellring darauf gelegt werden. Da die Bohrbilder auf den Flanschplatten asymmetrisch waren, war es nur so möglich, die Löcher auf die

Steifigkeitsscheiben zu übertragen. Außerdem musste nun markiert werden, welche Flanschplatten, Steifigkeitsscheiben und Teller zusammengehörten, da die verwendeten Flanschplatten nicht identisch waren.

Da die Stanzmaschinen maximal 3 mm starke Bleche stanzen können, wurden die Teller und Steifigkeitsscheiben wieder auseinandergeschraubt, die Löcher der Steifigkeitsscheiben gestanzt und an den Teller angezeichnet. Nachdem auch die Teller mit weiteren Löchern versehen waren, konnten alle drei Teile miteinander verschraubt werden. Allerdings wurde beim Stanzen etwas ungenau gearbeitet, weshalb die Flanschplatte auf einem der Teller nicht ganz genau mittig lag. Aus diesem Grund musste bei Teller und Steifigkeitsscheibe noch nachgefeilt werden. Wie bei der Fertigung der Teller bereits beschrieben, waren auch die Löcher in der Mitte der Teller nicht ganz mittig. Auch diese wurden nun durch Feilen vergrößert.

Der nächste Arbeitsschritt war, die Rotorblätter anzubringen. Dazu wurden die Mittellinien und an ihnen die Abstände der Rotorblätter zur Außenkante und zum Mittelpunkt der Teller mit einem Zentrierwinkel angerissen. Auch hier waren beim Schweißen zwei Personen gefordert: der Schweißer und jemand, der die Rotorblätter auf ihre richtigen Positionen niederdrückte. Das war oft ein gröberer Kraftakt, da die Rotorblätter nicht exakt dem vorgegebenen Durchmesser entsprachen und so händisch in ihre richtige Position gebogen werden mussten. Zunächst wurden die beiden Teile nur aneinander geheftet, um nach dem ersten Test der Anlage eventuelle Veränderungen leichter durchführen zu können. Der fertige Rotor wog insgesamt 31 kg.

Nun konnte die Welle eingeführt und durch die Wurmschrauben der Stellringe mit dem Rotor verbunden werden. Das Gestell wurde dabei gekippt, um den Rotor und die Welle leichter montieren zu können.

Erste Inbetriebnahme

Jetzt wurde die gesamte Anlage (135 kg) wieder aufgestellt und mit einem Gabelstapler aus der Halle geführt. Bereits durch den geringen Fahrtwind begann sich der Rotor langsam zu drehen.

Draußen waren bei leichtem Wind (es stand leider kein Anemometer zu Verfügung) 91 Umdrehungen pro Minute an der Rotorwelle zu messen. Der Rotor lief sehr rund und die gesamte Anlage war sehr stabil.



Abb. 44 Erste Inbetriebnahme des Savoniusrotors

4.3.5 Übersetzung mit Kettentrieb

Als der Getriebemotor geliefert wurde, wurde festgestellt, dass er ein sehr hohes Drehmoment benötigt, um anzulaufen. Es war daher nicht möglich den Generator direkt an die Welle anzubinden. Deshalb musste eine Übersetzung verwendet werden. Da unser Hauptsponsor größtenteils Kettenantriebe auf Lager hatte, wurde beschlossen, die Übersetzung mittels Kette durchzuführen.

Der Kettenantrieb hat, gegenüber dem Riementrieb den großen Vorteil, dass verschiedene Übersetzungsverhältnisse ausgetestet werden können, ohne neue Ketten kaufen zu müssen. Die Kette muss nur verlängert oder verkürzt werden. Ein weiterer Vorteil ist die formschlüssige und schlupffreie Leistungsübertragung und damit konstante Übersetzung. Da Ketten ohne Vorspannung laufen, werden die Lagerungen des Generators weniger belastet. Ein wichtiger Vorteil für das Verwenden des Kettentriebes am Savoniusrotor ist die Unempfindlichkeit gegen Schmutz und Feuchtigkeit.

Da die Zahnräder, über die die Kette läuft, über Passfedern leicht auszuwechseln sind, konnten verschiedene Übersetzungen ausprobiert werden. Die erste

Übersetzung, betrug 1:2 von Welle zu Generator, lieferte aber kein zufrieden stellendes Ergebnis.

Aus diesem Grund wurde die Übersetzung auf 1:3 erhöht. Mit dieser Übersetzung wurde erreicht, dass der Rotor schon bei geringen Windgeschwindigkeiten (~3 m/s) anläuft und daher wurden die späteren Tests mit dieser Übersetzung durchgeführt. Die Gesamtübersetzung von Welle zu Generator beträgt nun 14,2.

4.3.6 Endmontage

Rotor und Gestell wurden getrennt und die Rotorblätter an die Teller geschweißt, da keine Veränderungen mehr durchgeführt werden mussten. Die Schweißnähte waren eine große Herausforderung, da die Wandstärken der Rotorblätter nur 1,25 mm und die der Teller 2 mm betrugen. Es musste mit geringem Strom (66 A) und schneller Vorwärtsbewegung geschweißt werden, da eines der Bleche sonst hätte durchbrennen können. Trotzdem musste ein Schweißbad erzeugt werden, um die beiden Teile richtig zu verbinden. Hier wurden die Schweißnähte mit einem Beizgerät geputzt und auch die Lagerplatten wurden fertig verschweißt.

Als nächstes wurde die Verkleidung angefertigt. Dazu mussten alle Bleche zugeschnitten und gestanzt (siehe Abbildung 45) werden, während am Gestell noch eine Verstrebung an der gegenüberliegenden Wand der Plexiglasscheibe und für die Deckel zwei Stützplättchen angebracht wurden. Um die Blechplatten zu montieren, wurden Gewindebolzen an das Gestell geschweißt. Da das Arbeiten mit dem Bolzenschweißgerät nicht immer funktionierte, musste teilweise mit dem Schweißapparat bei 100 A nachgebessert oder der Bolzen ausgerichtet werden. Beim Ausrichten wurde vor dem Hämmern eine Mutter auf den Bolzen geschraubt, um dessen Gewinde nicht zu beschädigen.



Abb. 45 Stanzen der Verkleidungsbleche

Die 6 mm dicke Plexiglasscheibe wurde zugeschnitten und mit Bohrungen versehen. Um die Sterngriffe anbringen zu können, wurden auch hier die Gewindebolzen am Gestell angeschweißt. Auf der Seite des Scharniers wurden Gewinde in das Gestell geschnitten und zwei Plättchen montiert, die den 6 mm Höhenunterschied, verursacht von der Wandstärke der Plexiglasscheibe, kompensieren sollten.

Um das Gestell später besser am Standort fixieren zu können wurden noch Halteringe an den vier Eckpunkten des Gestells mit 117 A angeschweißt. Mit ihnen und passenden Drahtseilen sollte die Anlage später am Boden niedergespannt werden.

Die Batterien wurden in Behältern in der Nähe des Generators platziert, um die Kabellänge möglichst kurz zu halten. Für den Fall, dass Säure aus den Batterien austritt, oder Feuchtigkeit in die Anlage eintritt, wurden diese Batteriebehälter mit Bohrungen im Boden versehen. Da die Kraftübertragung von Welle zu Generator mit einem Kettentrieb erfolgt, wurde ein Kettenspanner gefertigt. Dieser hat ein Langloch das parallel zur Kette verläuft. So kann der Motor, der auf einer Platte sitzt, die am Kettenspanner montiert ist, passend verschoben werden. Dadurch wird die Kette gespannt. Nach dem Montieren der Motorbefestigung wurde das Gestell Weise durch Mitarbeiter der Firma Werfring lackiert.

5. Der Maximum Power Point Tracker

5.1. Allgemeines: Das Prinzip vom MPPT

Der Maximum Power Point Tracker (MPPT) ist die elektronische Komponente des Gesamtaufbaus, die dafür sorgt, dass die Leistung des Savoniusrotors möglichst optimal in elektrischer Form in einen Akkumulator gespeist wird. Er besteht aus einem Step-Up Converter, der die geringere Eingangspannung des Gleichstromgenerators auf ein höheres Niveau wandelt, um so den Akkumulator ständig zu laden. Die Funktion des Step-Up Converters wird in Kapitel 5.2.1 „Prinzip des Step-Up Convertes“, erklärt.

Durch das Schalten des Step-Up Converters wird jedoch nicht nur die Ausgangsspannung zum Laden des Akkus bestimmt, sondern auch der Ersatzwiderstand, also die Last, die auf den Generator und somit auch auf den Savoniusrotor, wirkt. Um diese Last an die gegebenen Windverhältnisse anzupassen und den Aufbau im Maximum Power Point (= optimale Leistungsentnahme) zu betreiben, muss der Wandler also geregelt werden. Dies wird in Abbildung 46 gezeigt.

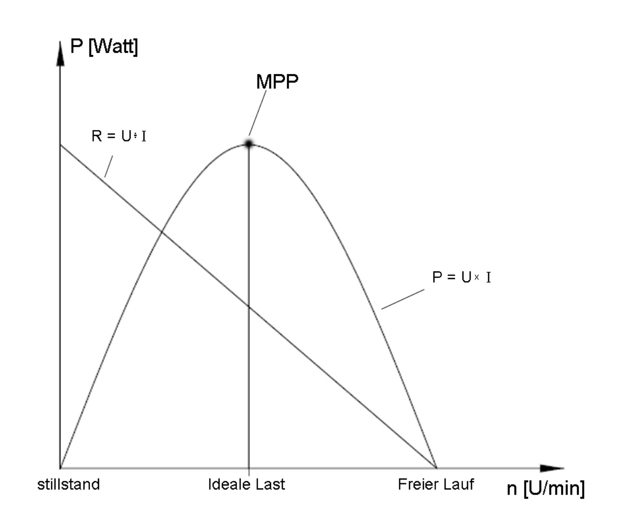


Abb. 46 Umdrehungs-Leistungsdiagramm mit MPP: zeigt den Verlauf bei konstanter Windstärke

Die Regelung des Step-Up Converters übernimmt ein Mikroprozessor. Dieser muss ständig überwachen, ob die aktuelle Leistung optimal ist. Hierzu testet er, ob sich eine Erhöhung oder Verringerung der Schaltdauer des Wandlers positiv oder negativ auf die Leistung auswirkt. Dazu muss er ständig Spannung und Strom messen, um daraus die Leistung zu berechnen. Diese wird mit dem vorherigen Wert verglichen. Ist die neue Leistung gestiegen, war die Änderung der Schaltdauer richtig und sie kann

weiter in diese Richtung verändert werden. Ist die Leistung jedoch gesunken, muss eine Umkehr der Änderung stattfinden. Außerdem muss der Kontroller darauf achten, dass kein Kurzschluss zustande kommt, oder die Schaltung durch sonstige Vorgänge im Betrieb zu Schaden kommt, d.h. er darf nur 0% - 90% Schaltdauer zulassen. Die gesamte Schaltung und damit auch die Regelung muss natürlich möglichst stromsparend arbeiten, um so das Entladen des Akkumulators bei ausbleibendem Wind zu verhindern und den Wirkungsgrad des Maximum Power Point Trackers möglichst hoch zu halten.

Der Mikrokontroller benötigt also zur Überwachung des Step-Up Converters ausreichend Analog - Digital Wandler für die Messungen und mindestens einen PWM-Ausgang zur Transistoransteuerung. Außerdem benötigt er ausreichend Rechenleistung um die notwendigen Berechnungen und Vergleiche anstellen zu können. Daher wurde der PIC 16F88 als Microchip ausgewählt, der alle diese Anforderungen erfüllt (Für genauere Angaben zum Microchip siehe Datenblatt im Anhang H).

5.2. Der Step-Up Converter

5.2.1 Prinzip des Step Up Converters

Der Step-Up Converter ist der Leistungsteil der Elektronik. Er wandelt die geringe Eingangsspannung in eine höhere Ausgangsspannung um und bedient sich dabei einer Induktivität als Energiespeicher.

Anhand eines vereinfachten Schaltplans, ersichtlich in Abbildung 47 lässt sich sein Funktionsprinzip leicht erklären.

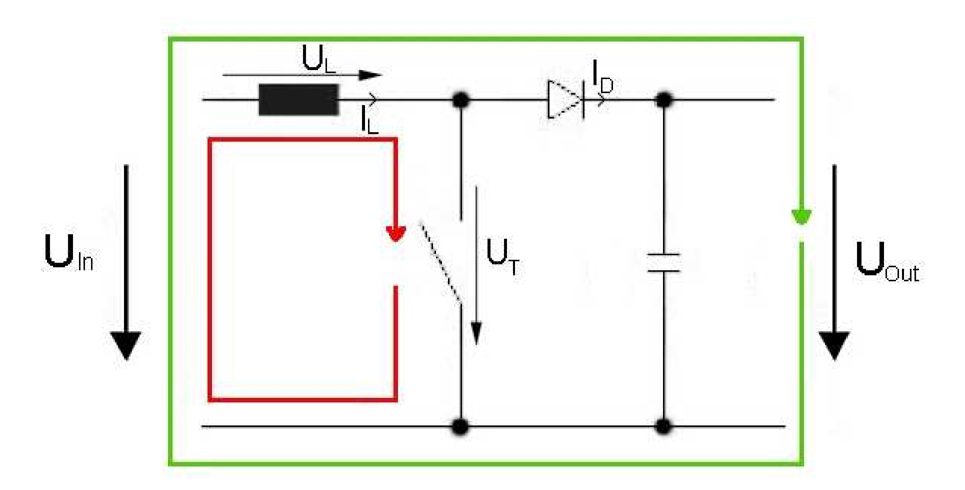


Abb. 47 Prinzip des Step-Up Converter

Der Aufwärtswandler besteht aus zwei überlagerten Stromkreisen, die abwechselnd, durch den Schalter bestimmt, aktiv sind.

Ist der Schalter, der meist als MOSFET ausgeführt wird, geschlossen, bildet er mit der Induktivität einen Stromkreis. Der Spulenstrom steigt linear an, erzeugt ein magnetisches Feld und speichert so die Energie in der Induktivität.

Wird der Schalter geöffnet, beginnt das Magnetfeld zusammenzubrechen und induziert eine Spannung, um der Zustandsänderung entgegenzuwirken. So erhält die Spule den Stromfluss aufrecht. Die Spulenspannung wird mit der Eingangsspannung addiert ($U_{In} < U_{Out}$) und treibt so den Strom durch die Sperrdiode, die verhindert, dass Strom in die falsche Richtung zum Ausgang fließt. Ist die Spule entladen bevor der Schalter wieder geschlossen wird, sinkt der Spulenstrom auf Null ab, der Strom lückt. Man spricht von der so genannten GAP-Zeit im diskontinuierlichen Betrieb. Im Normalbetrieb, beziehungsweiße kontinuierlichen Betrieb eines Aufwärtswandlers sollte dies nie auftreten.

Ebenso wie am Ausgang wird auch am Eingang des Aufwärtswandler ein Kondensator parallel geschaltet. Die Kapazitäten dienen dazu das Ein- und Ausgangssignal zu glätten und konstant zu halten, beziehungsweiße einen plötzlichen Spannungseinbruch zu verhindern. Mit seiner Ladung wird die Schaltung beziehungsweise die Last versorgt wenn sonst kein Strom zur Verfügung stehen würde. Dadurch wird die Welligkeit des Signals verringert.

Im der folgenden Abbildung 48 lassen sich die Spannungs- und Stromverläufe erkennen, um die Schaltvorgänge besser nachvollziehen zu können.

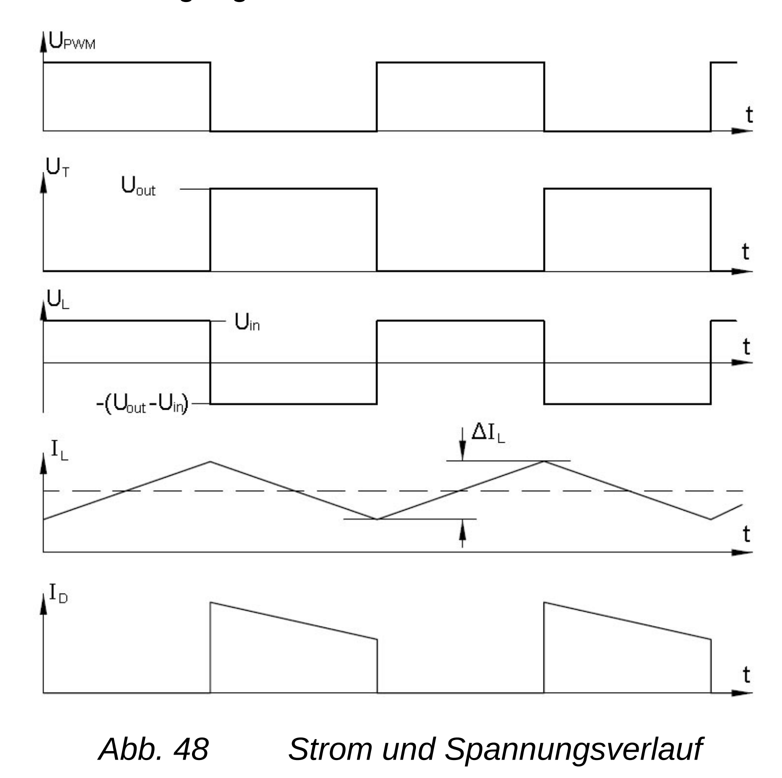


Abb. 48 Strom und Spannungsverlauf

Man kann den Aufwärtswandler auch mittels einer Energiebetrachtung beschreiben welche in Abbildung 49 dargestellt wird: Während der Ein-Phase des Schalters wird Energie in die Induktivität geladen. Diese wird während der Aus-Phase samt der Eingangsenergie an den Ausgang übertragen.

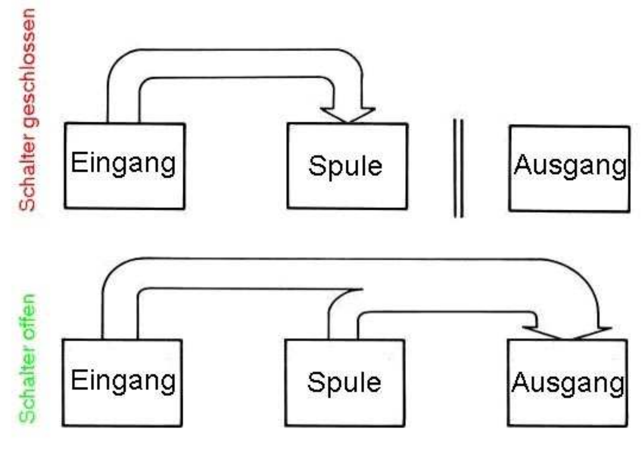


Abb. 49 Energiebetrachtung

Daran lässt sich auch leicht erkennen, dass beide Ladungsmengen gleich bleiben müssen. $Q_{Ein} = Q_{Aus}$, daraus ergibt sich:

$$U_{In} \cdot t_{on} = (U_{Out} - U_{In}) \cdot t_{off} \qquad U_{Out} = U_{In} \cdot \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}}$$

Im kontinuierlichen Betrieb lässt sich aus dem Induktionsgesetz eine wichtige Formel für die Differenz des Spulenstroms ableiten, die zur Dimensionierung der Spule eines Aufwärtswandlers nötig ist.

$$u = L\frac{di}{dt} \quad \Rightarrow \quad \Delta i = \frac{1}{L} u \cdot \Delta\, t$$

$$\Rightarrow \quad \Delta I_L = \frac{1}{L}(U_{Out} - U_{In}) \cdot t_{on}$$

$$\textit{für} \quad t_{on} = t_{off} \quad \Rightarrow \quad \Delta I_L = \frac{1}{L}(U_{Out} - U_{In}) \cdot \frac{U_{In}}{U_{Out}} \cdot \frac{1}{f}$$

$$L = \frac{1}{\Delta I_L}(U_{Out} - U_{In}) \cdot \frac{U_{In}}{U_{Out}} \cdot \frac{1}{f}$$

5.2.2 Dimensionierung

Zur Dimensionierung des Step-Up Converters wird folgender Schaltplan verwendet.

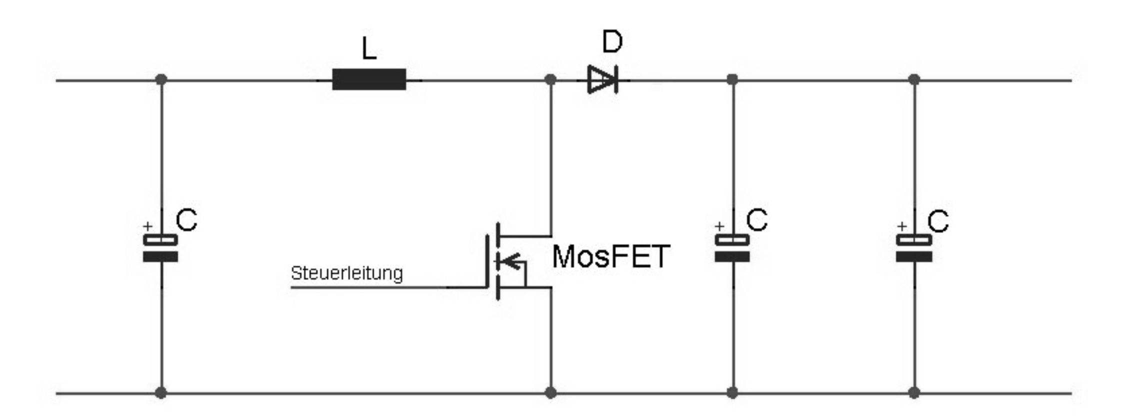


Abb. 50 Step-Up Converter Schaltung

Da die Spule als Energiespeicher dient und nicht im diskontinuierlichen Betrieb gearbeitet werden soll, muss diese groß genug sein, um am Ausgang genügend Energie zu Verfügung zu stellen. Aus den Formeln des Step-Up Converters lässt sich folgende Gleichung zur Berechnung der Spule ableiten:

$$L = \left(\frac{1}{\Delta I_L}\right) \cdot (U_{Out} - U_{In}) \cdot \left(\frac{U_{In}}{U_{Out}}\right) \cdot \left(\frac{1}{f}\right)$$

Die Kondensatoren am Ein- und Ausgang des Step-Up Converters dienen der Glättung des Signals. Der Ausgangskondensator wird während der Zeit t_{off} geladen und muss während der Zeit t_{on} den Ausgang mit Strom versorgen. Der Strom fließt also zweimal durch ihn, daher wirkt sich auch sein Equivalent Series Resistance (ESR) stärker aus. Für eine zulässige Schwankung des Ausgangssignals gilt folgende Formel:

$$C > \frac{I_{Out} \cdot DC}{f \cdot dU_{Out}}$$

Bei größeren Lastströmen und höheren Schaltfrequenzen (f > 10 kHz) wirkt sich der ESR noch stärker aus.

Außerdem gilt: $dU_{Out} = \frac{I_{Out} \cdot ESR}{DC}$

Bauteilermittlung

Folgende Parameter wurden zur Dimensionierung des Step-Up Converters festgelegt:

$U_{Ein\ Max}$	= 26 V	....	die maximal auftretende Eingangsspannung
$I_{Ein\ Max}$	= 5 A	....	der maximale Eingangsstrom
$U_{EIN\ MIN}$	= 4 V	....	die minimale Eingangsspannung
$I_{EIN\ MIN}$	= 0,5 A	....	der minimale Eingangsstrom
F	= 40 000 Hz	....	die Schaltfrequenz des Transistors
ESR	= 60 mΩ	....	angenommener Innenwiderstand
ΔI_L	= 20% I_{Ein}	....	die Welligkeit des Spulenstroms

Mit diesen Angaben kann die Berechnung durchgeführt werden.

Induktivität

Für die Induktivität ergibt sich folgende Berechnung:

$$L_{MIN} = \left(\frac{1}{\Delta I_L}\right) \cdot (U_{Out} - U_{In}) \cdot \left(\frac{U_{In}}{U_{Out}}\right) \cdot \left(\frac{1}{f}\right)$$

$$L_{MIN} = \left(\frac{1}{1\ A}\right) \cdot (27{,}6\ V - 26\ V) \cdot \left(\frac{26\ V}{27{,}6V}\right) \cdot \left(\frac{1}{40.000\ Hz}\right)$$

L_{MIN} = 37,681 ˙ 10^{-6} H = 37 µH

$$L_{MAX} = \left(\frac{1}{\Delta I_L}\right) \cdot (U_{Out} - U_{In}) \cdot \left(\frac{U_{In}}{U_{Out}}\right) \cdot \left(\frac{1}{f}\right)$$

$$L_{MAX} = \left(\frac{1}{0{,}1\ A}\right) \cdot (27{,}6\ V - 4\ V) \cdot \left(\frac{4\ V}{27{,}6V}\right) \times \left(\frac{1}{40.000\ Hz}\right)$$

L_{MAX} = 855,072 ˙ 10^{-6}H = 855 µH

Die Spule muss neben der berechneten Induktivität auch einen ausreichend großen Drahtquerschnitt besitzen, um den Spulenstrom auszuhalten. Da keine geeignete Spule bei einem Händler in kurzer Zeit erhältlich war, wurde diese selbst gewickelt.

Dafür wurde ein 2 mm² lackisolierter Kupferdraht um einen Ferrit-Ringmagnet gewickelt. Die Kennwerte der Spule wurden mit Messgeräten überprüft.

L_{gem} = 844 µH

R = 0,14 Ω

Durch den Ohm'schen Widerstand lässt sich auch der Ohm'sche Verlust in der Spule berechnen.

$$P = R \cdot I^2 = 0{,}14\Omega \cdot 25A^2 = 3{,}5W$$

Kondensatoren

Die Berechnung des Kondensators sieht folgendermaßen aus:

$$dU_{out} = \frac{I_{Out} \cdot ESR}{DC} = \frac{I_{In} \cdot \frac{U_{In}}{U_{Out}} \cdot ESR}{DC}$$

$$dU_{out} = \frac{5A \cdot \frac{26V}{27{,}6V} \cdot 60m\Omega}{0{,}9} = 0{,}314V$$

$$C > \frac{I_{Out} \cdot DC}{f \cdot dU_{Out}} = \frac{I_{In} \cdot \frac{U_{In}}{U_{Out}} \cdot DC}{f \cdot dU_{Out}}$$

$$C > \frac{5A \cdot \frac{26V}{27{,}6V} \cdot 0{,}9}{40.000Hz \cdot 0{,}314V} = 337{,}5\mu F$$

Bei den Ausgangskondensatoren werden zwei Kondensatoren parallel geschaltet um die geforderte Kapazität zu erreichen. Dadurch verringert sich der Gesamtinnenwiderstand der Kapazität, der verantwortlich für die Leistungsverluste im Kondensator ist. Außerdem werden großvolumige Kondensatoren verwendet, da diese in der Regel oft einen kleineren ESR besitzen. Es werden zwei 1000 µF/63 V ELKOs verwendet, da diese die Anforderungen erfüllen und uns von unserem Betreuer, DI Meschik, zur Verfügung gestellt wurden.

MOSFET

Als Schalter wird ein Power MOSFET verwendet. Dieser muss den auftretenden Strom I = 5 A schalten können und gleichzeitig die maximale Spannung aushalten. Die Wahl fiel auf den BUZ102AL von Siemens; Er hält 50 V und 42 A aus und hat nur einen Innenwiderstand von 28 mΩ.

Die Verluste am Transistor sind vor allem während der Schaltvorgänge zu berücksichtigen. Die nachstehende Abbildung 51 zeigt den Strom- und Spannungsverlauf während eines solchen Schaltvorgangs.

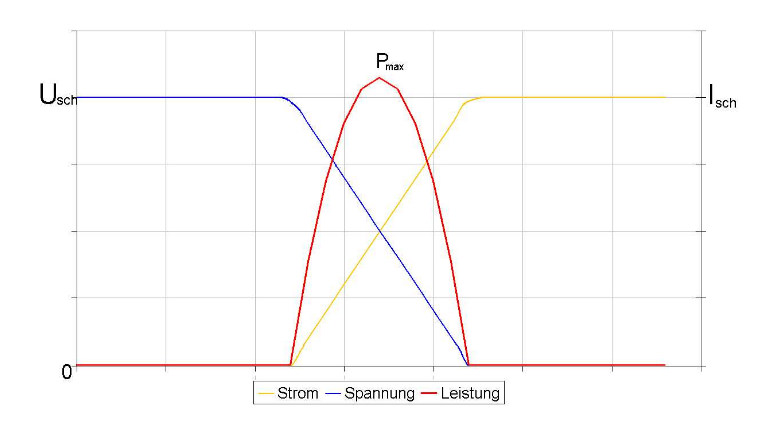


Abb. 51 Step-Up Converter Schaltung

In der Abbildung erkennt man einen Umschaltvorgang des Transistors. Dabei sinkt einerseits die abfallende Spannung während der Strom gleichzeitig steigt. Das Leistungsmaximum ergibt sich daher zur Umschaltmitte. Da die genaue Berechnung ein Integral über die gesamte PWM-Periode ist, wird eine einfache Ersatzformel angewandt um die Verlustleistung zu errechnen. Dabei wird die maximale Leistung halbiert und so auf die gesamte Umschaltzeit gerechnet:

$$P_{V\,sch} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{Sch}}{2} \cdot \frac{I_{sch}}{2} \cdot \frac{t_{sch}}{T_{PWM}}$$

t_{sch} ...... Umschaltzeit, die gesamte Ein- und Ausschaltzeiten. Da der Transistor auch eine induktive Last schaltet, werden die Werte mit einem Oszilloskop nachgemessen.

t_f = 800 ns

t_r = 500 ns

$t_{sch} = t_f + t_r$ =1300 ns = 1,3 µs

$$P_{v\ sch} = \frac{1}{2} \cdot \frac{26V}{2} \cdot \frac{5A}{2} \cdot \frac{1{,}3\mu S}{25\mu S} = 0{,}845W$$

Für den durchgeschalteten Zustand gilt folgende Formel:

$$P_{v\ on} = R_{DSon} \cdot I^2 = 0{,}028\Omega \cdot 25A^2 = 0{,}7W$$

Die gesamte Verlustleistung setzt sich wie folgt zusammen:

$$P_{v\ ges} = P_{v\ sch} + P_{v\ on} \cdot \frac{(T_{PWM} \cdot 0{,}9 - t_{sch})}{T_{PWM}} = 0{,}845W + 0{,}7W \cdot \frac{(25\mu S \cdot 0{,}9 - 1{,}3\mu S)}{25\mu S} = 1{,}4386W$$

Sperrdiode

Die Sperrdiode muss ebenfalls für die maximal auftretenden Ströme und Spannungen ausgelegt sein. Gewählt wurde die Schottky-Diode MBR1645 von International Rectifier, da diese für das Schalten in höheren Frequenzbereichen geeignet ist. Sie hält konstant 16 A und Spitzenströmen von 32 A stand und hält eine Spannung von 45 V aus. Zur Verlustberechnung werden aus dem Spannungs-Stromdiagramm im Datenblatt (Anhang H) die nötigen Werte ausgelesen. Es wird ein Stromwert von 5 A angenommen und die zugehörige Spannung abgelesen: U_F= 0,5 V.

$$P = U \cdot I = 0{,}5V \cdot 5A = 2{,}5W$$

Die Verluste von 2,5 W treten nur im durchgeschalteten Zustand auf.

Kühlung

Aufgrund der Leistungsberechnungen wurde entschieden, die Halbleiter mit einem Kühlkörper zu versehen. Da alle drei Bauteile, die beiden MOSFETS und die Schottky-Diode, direkt nebeneinander auf der Platine platziert waren, konnte dafür ein einzelner Kühlkörper verwendet werden. Allerdings musste aus diesem Grund der Kühlkörper isoliert angebracht werden. Verwendet wird ein L-Profil aus Aluminium mit R_{th} = 4 K/W.

Die Erwärmung des Kühlkörpers kann folgendermaßen berechnet werden:

$$T = P_{v\ ges} \cdot R_{th}$$

$$T = \left[P_{v\ sch} + \left(P_{SD} + P_{v\ on}\right) \cdot \frac{\left(T_{PWM} \cdot 0{,}9 - t_{sch}\right)}{T_{PWM}} \right] \cdot R_{th}$$

$$T = \left[0{,}845W + \left(2{,}5W + 0{,}7W\right) \cdot \frac{\left(25\mu S \cdot 0{,}9 - 1{,}3\mu S\right)}{25\mu S} \right] \cdot 4K/W = 14{,}2344°C$$

Zur Isolierung des Kühlkörpers werden Glimmerscheiben und Gummibeilagscheiben verwendet.



Abb. 52 und 53 Isolierset und Montage

Optimierung:

Zur Verringerung der Verluste wären noch weitere Optimierungen möglich. Der Transistor sollte hierfür einen möglichst geringen On-Widerstand R_{DSon} und kürzere Schaltzeiten besitzen. Die Schaltzeit kann außerdem durch parallel schalten eines zweiten Transistors verringert werden. Bei der Spule und dem Kondensator muss der Widerstand verringert werden. Beim Kondensator kann hierbei auf eine Parallelschaltung mehrerer großvolumiger Kondensatoren zurückgegriffen werden, was nicht nur den ESR-Widerstand senkt, sondern auch das Ripple der Ausgangsspannung.

Die Spule kann nur durch kürzere Leitungen einen geringeren Widerstand erhalten, daher wäre ein Magnetkern mit einer höheren Permeabilität einsetzbar, um so auf mehrere Drahtwicklungen verzichten zu können. Durch eine höhere Schaltfrequenz des Step-Up Converters ließe sich ebenfalls die Baugröße der Spule verringern.

5.3. Beschreibung des MPPT-Schaltungsaufbau

Das Blockschaltbild, auf welches alle folgenden Beschreibungen bezogen sind, sieht wie folgt aus:

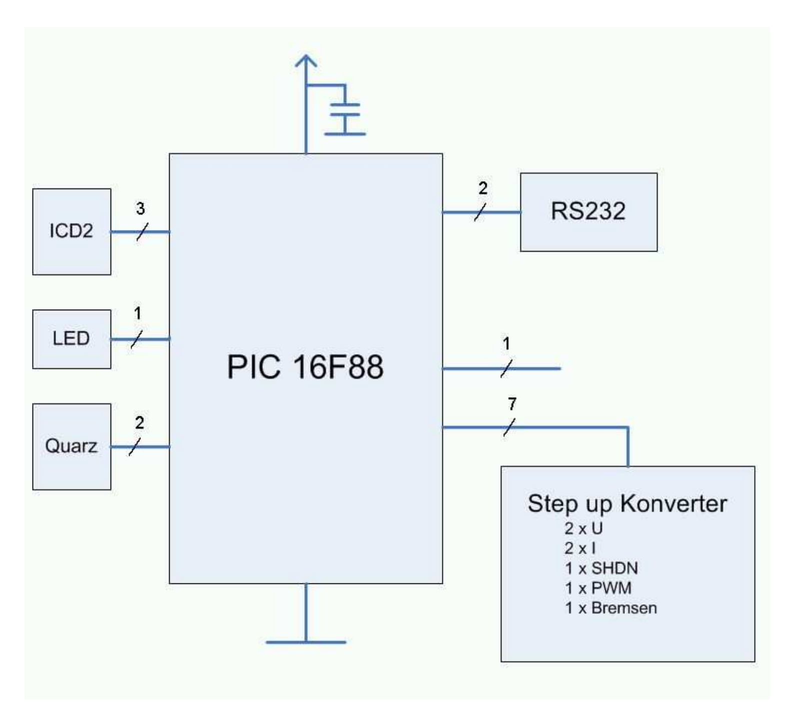


Abb. 54 Blockschaltbild

Zum verbesserten Verständnis der Beschreibungen wird auch der Schaltplan aus dem Anhang G benötigt.

5.3.1 Anforderungen

Der Step-Up Converter ist das Herzstück der Elektronik des Maximum Power Point Trackers. Für die Steuerung und Kontrolle dieser Schaltung mussten aber weitere Verbindungen zwischen dem Aufwärtswandler und dem PIC geschaffen werden. Dazu wurde zuerst ein Blockschaltbild mit allen Anforderungen und Wünschen an die wirkliche Platine entworfen. Anhand dieser Überlegung und Skizze kann man mit dem Zeichnen des großen Schaltplans starten. Das Blockschaltbild wurde in mehreren Schritten erarbeitet. Zuerst wurden alle wichtigen Steuerungs- und Messleitungen zwischen PIC und Step-Up Converter geplant. Es müssen die Spannung und der Strom am Eingang des Aufwärtswandlers gemessen werden, das heißt je eine Messleitung für Strom und Spannung gehen vom Schaltungseingang zum PIC16F88. Außerdem müssen für eine mögliche Steuerung des Wandlers die aktuelle Ausgangsspannung und der Ladestrom messbar gemacht werden, auch dazu wird je eine Leitung benötigt. Die letzte wichtige Verbindung geht vom PWM

(Pulsweitenmodulation) Ausgang zu einem MOSFET-Transistor, der den Aufwärtswandler steuert.

5.3.2 PIC-Versorgung LT1129 – Quarz

Der Maximum Power Point Tracker regelt die Eingangsspannung auf eine höhere Ausgangsspannung, die im Bereich von 24 V bis 27,8 V liegt. Mit dieser Spannung vom 24 V-Akkumulator kann man nicht direkt die Elektronik, wie Mikroprozessor, Treiberbausteine und andere ICs, versorgen. Es mussten daher fertige Spannungsregler eingesetzt werden, die Spannungen bis 30 V in 5 V und 12 V regeln können. Dabei sollten außerdem möglichst geringe Verluste auftreten. Für die MPPT-Schaltung wurde der LT1129 von Linear Technologies eingesetzt, den es unter anderem im TO-220 Gehäuse in Ausführungen von 3,3 V, 5 V und einstellbarer Ausgangsspannung gibt. Es musste daher die Außenbeschaltung für 12 V und 5 V berechnet werden, denn diese beiden Spannungspegel können die gesamte Regelelektronik ausreichend versorgen.

Berechnungen Spannungsregler LT1129:

Die Formeln zur Berechnung wurden aus dem Datenblatt (Anhang H) für LT1129 entnommen. In den ersten Rechenschritten wurden die Widerstandswerte für den erforderlichen Spannungsteiler am Regler ermittelt. Anschließend wurden die auftretenden Verlustleistungen und die maximale Betriebstemperatur errechnet. Die Ausgangsspannung und –strom des LT1129 wurden anhand der Schaltungsanforderungen eingerechnet, alle weiteren Daten wurden vom Datenblatt übernommen.

Für die Berechnung der 12 V-Spannungsversorgung gelten folgende Überlegungen.

R1 = 100 kΩ, U = 12 V, R2 = ?

U_{ADJ} = 3,75 V, I_{ADJ} = 150 nA

$$Vout = V_{ADJ} . \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) + \left(I_{ADJ} . R2\right)$$

$$12V = 3{,}75V + \frac{R2}{100k\Omega} . 3{,}75V + 150nA . R2$$

$$\Rightarrow R2 = \left(\frac{12V - 3{,}75V}{\frac{3{,}75V}{100k\Omega} + 150.10^{-9}} \right) = 219{,}123k\Omega$$

Der gesuchte Widerstand ergibt R2 = 220 kΩ.

$I_{OUT\ MAX}$ = 100 mA

I_{GND} = 25 mA

$V_{IN\ MAX}$ = 30 V

V_{OUT} = 12 V

T Package, 5-Lead TO-220

Thermal Resistance (Junction-to-Case) = T_R = 5℃/W

$$P = I_{OUT\,MAX} \cdot (V_{IN\,MAX} - V_{OUT}) + (I_{GND} \cdot V_{IN\,MAX}) =$$
$$P = 0{,}1\,A \cdot (30\,V - 12\,V) + (0{,}025\,A.30\,V) = 2{,}55\,W$$

$$T_{J\,MAX} = P \cdot T_R + T_0 =$$
$$T_{J\,MAX} = 2{,}55\,W \cdot 5\,°C/W + 50\,°C = 62{,}75\,°C$$

Die Verlustleistung beim 12 V Spannungsregler beträgt 2,55 W, dadurch wird der Bauteil im TO-220 Gehäuse auf 62,75 ℃ erhitzt.

Für die Berechnung der 5 V-Spannungsversorgung gelten folgende Überlegungen.

R1 = 100 kΩ, U = 5 V, R2 = ?

$$Vout = V_{ADJ} \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) + \left(I_{ADJ}.R2\right)$$

$$5V = 3{,}75V + \frac{R2}{100k\Omega} \cdot 3{,}75V + 150nA.R2$$

$$\Rightarrow R2 = \left(\frac{5V - 3{,}75V}{\frac{3{,}75V}{100k\Omega} + 150.10^{-9}}\right) = 33{,}333k\Omega$$

Der gesuchte Widerstand ergibt R2 = 33 kΩ.

$I_{OUT\ MAX}$ = 100 mA

I_{GND} = 25 mA

$V_{IN\ MAX}$ = 30 V

V_{OUT} = 5 V

T Package, 5-Lead TO-220

Thermal Resistance (Junction-to-Case) = T_R = 5°C/W

$$P = I_{OUT\ MAX} \,.\, (V_{IN\ MAX} - V_{OUT}) + (I_{GND} \cdot V_{IN\ MAX}) =$$
$$P = 0{,}1\ A.(30\ V - 5\ V) + (0{,}025\ A.30\ V) = 3{,}25\ W$$

$$T_{J\ MAX} = P.T_R + T_0 =$$
$$T_{J\ MAX} = 3{,}25\ W.5\ °C/W + 50\ °C = 66{,}25\ °C$$

Die Verlustleistung beim 5 V Spannungsregler beträgt 3,25 W, dadurch wird der Bauteil im TO-220 Gehäuse auf 66,25 °C erhitzt.

Weiters wichtig ist die Verwendung eines externen Oszillators, da der interne Oszillator des PIC16F88 maximal 8 MHz erzeugt. Um eine erforderliche PWM-Steuerfrequenz von ca. 40 kHz zu ermöglichen, sind 8 MHz eine zu niedrige Frequenz. Mit Hilfe einer kurzen Berechnung wurde die erforderliche Quarzfrequenz ermittelt.

Interner Oszillator: 4 MHz aufgeteilt für 8 Bit

$$2^8 \text{ Möglichkeiten} = 256$$

$$\frac{8\ \text{MHz}}{256} = 31{,}25\ \text{kHz}$$

Die Steuerung des Transistors muss mit einer Pulsweitenmodulation in einem Frequenzbereich von 35 bis 70 kHz erfolgen. Der interne Oszillator ist daher für die Steuerung des Step-Up Converters ungeeignet, es wird ein externer Quarz benötigt. Die Berechnung mit einem 10 MHz Quarz ergibt ein brauchbares Ergebnis von ca. 40 kHz PWM, auch eine noch schnellere Oszillatorfrequenz wäre denkbar.

10 MHz Quarz: 10 MHz aufgeteilt für 8 Bit

$2^8 \text{ Möglichkeiten} = 256$

$\frac{10\,\text{MHz}}{256} = 39{,}0625\,\text{kHz}$

Der externe Quarz benötigt zwei Pins des PIC16F88. Eine weitere wichtige Erweiterung der Schaltung ist die Möglichkeit einer Notabschaltung. Dazu muss ein Ausgang mit einem leistungsstarken MOSFET-Transistor verbunden werden, der einen Bremswiderstand aktiviert, um den Rotor auch ohne Last zu bremsen. Der Widerstand liegt im 5 bis 10 Ω Bereich und hält hohe Leistungen aus, wodurch der Rotor über den Generator elektrisch belastet und gebremst wird. Diese Option muss dann aktiviert werden, wenn auf Grund der vollständigen Aufladung des Akkus keine weitere Ladung mehr vorgenommen werden darf. Um die Batterien vor Überladung schützen zu können, muss bei Vollladung die Weiterladung verhindert werden können. Die Belastung des Generators erfolgt dann über den Bremswiderstand und damit wird der Rotor durch die Belastung gebremst, ohne außer Kontrolle zu geraten. Als Transistor wird wieder ein BUZ102 verwendet (→ siehe Kapitel 5.2.2 Dimensionierung), da dieser auch die hohen Spannungen und Ströme unbeschadet aushält. Um den Transistor mittels PIC steuern zu können wird der zweite Kanal des Treibers TC4427A (→ siehe Kapitel 5.3.4 Transistorsteuerung) verwendet. Der Widerstand wird so dimensioniert, dass möglichst viel Strom fließt und so die Belastung des Generators zu einer Bremsung führt. Die Dimensionierung erfolgt am einfachsten mit Hilfe des ohm'schen Gesetzes:

Lastaufnahme von U = 30 V und I_{Brems} = 5 A

$$\Rightarrow R = \frac{U}{I} = \frac{30V}{5A} = 6\Omega$$

Der gewählte Bremswiderstand beträgt 6,8 Ω.

Mit der folgenden Formel wird die auftretende Maximalleistung ermittelt.

$$P = U \cdot I = 30V \cdot 5A = 150W$$

Anhand der Rechenergebnisse wurde ein 200 W Leistungswiderstand mit dem Wert 6,8 Ω ausgewählt.

5.3.3 Messung

Die **Spannungsmessung** erfolgt mit Hilfe eines einfachen Spannungsteilers, der so dimensioniert sein muss, dass der messbare Spannungsbereich zwischen 0V und Maximalspannung des Generators auf einen Bereich zwischen 0V und maximal 5V

aufgeteilt wird. Eine Anforderung an die PIC-Steuerung ist allerdings sehr hohe Sparsamkeit, um die Entladung des Akkus durch die Steuerung möglichst gering zu halten. Aus diesem Grund ist der einfache Spannungsteiler nicht gut genug. Die Schaltung darf nur kurze Zeit während der Messung Strom verbrauchen, weswegen man eine etwas aufwendigere Messschaltung mit zwei unipolaren Transistoren braucht. Die Transistoren erlauben dem PIC eine gezielte Ansteuerung, das heißt nur für kurze Zeit wird die Spannungsmessung zum Mikroprozessor verbunden. Die Ansteuerung des Schalttransistors der Spannungsmessschaltung benötigt einen weiteren PIC-Ausgang. Somit kann man mit dem Mikroprozessor kurzzeitig die Spannungsmessung zum PIC-Eingang verbinden, die Spannung am Eingang bzw. Ausgang kann man mit Hilfe des ADC-Moduls und der geschriebenen Software mit dem PIC16F88 direkt einlesen.

Als nächstes wurden Überlegungen zur **Strommessung** unternommen. Auch hier musste eine möglichst sparsame Lösung gefunden werden. Ströme kann man mittels PIC nicht einfach direkt aus der Schaltung messen, es werden weitere eigene spezielle IC-Bausteine benötigt. Die entwickelte Steuerschaltung verwendet zur Strommessung den Bauteil MAX472 der Firma Maxim. Dieser Bauteil eignet sich besonders für die MPPT-Steuerung, da er einfach den Strom über einen definierten Sensorwiderstand direkt aus der Schaltung messen kann. Die Sparsamkeit erreicht der IC mit Hilfe der Shutdown-Leitung, wodurch auch der Stromverbrauch der Strommessung auf kurze Zeit beschränkt werden kann. Die Shutdown-Leitungen beider Strommessungseinheiten sind mit einer Leitung an den PIC verbunden. Mit Hilfe eines weiteren Transistors kann der PIC die Messung einschalten und erhält erst dann die Messwerte am Eingang. Am Output des MAX472 wird bei richtiger Dimensionierung des Ausgangswiderstands der gemessene Stromwert proportional in Form einer Spannung ausgegeben. Somit wird dem PIC eine brauchbare Strommessung ermöglicht, da der PIC die Spannung des MAX472 mittels AD-Wandlung messen und aufnehmen kann.

Im Anschluss erfolgt die Berechnung des Spannungsteilers bei der AD-Wandlung.

R2 = 10kΩ

$$\frac{U1}{U2} = \frac{R2 + R1}{R2}$$

$$R1 = \frac{U1}{U2} \cdot R2 - R2 = \frac{30V}{5V} \cdot 10k\Omega - 10k\Omega =$$

$$R1 = 50k\Omega$$

Der Widerstand R1 ergibt R1 = 50 kΩ.

In der Leiterplatte erfolgt der exakte Aufbau durch die Serienschaltung von 47 kΩ und 3,9 kΩ = 50,9 kΩ (→ Siehe Abbildung 8).

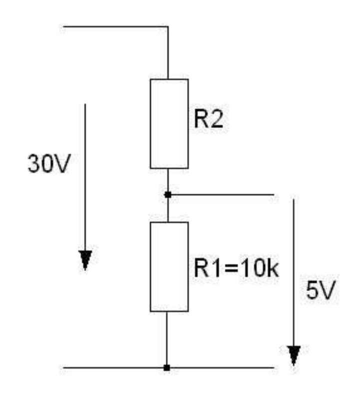


Abb. 55 Spannungsteiler

Die Verluste und Leistungen im Step-Up Converter werden mit folgenden Formeln berechnet.

Worst-case: U = 28V, I = 5A

Der Leistungsabfall am 5mΩ Messwiderstand für Strommessung berechnet sich wie folgt:

$$P = R \cdot I^2 = 5m\Omega \cdot 5^2 A^2 = 125mW = 0{,}125W$$

Als Ausgangswiderstand bei den ICs MAX472 wurde eine Serienschaltung von 1 kΩ und 3,9 kΩ verwendet, das heißt der Gesamtwiderstand beträgt 4,9 kΩ. Dieser Ausgang entspricht einer Spannung von 4,9 V am PIC-Eingang bei einem Strom von 10 A im MPPT.

5.3.4 Transistorsteuerung

Die programmierte Software des Mikrokontrollers ermöglicht dem PIC eine weitere Verarbeitung der Messwerte und ermittelt das dementsprechende PWM-Signal. Dieses Signal muss über den Steuerausgang zum MOSFET-Transistor übertragen werden, der dadurch seine Ein- und Ausschaltzeit verändert und den

Step-Up Converter regelt. Als Transistor wird ein MOSFET vom Typ BUZ102 der Firma Siemens eingesetzt. Dieser Bauteil ist für Spannungen bis 50 V und einen Maximalstrom von 30 A ausgelegt. Der BUZ102 benötigt zur Ansteuerung eine Spannung über 5 V, weshalb man einen Treiber einsetzen muss. Als Treiber wird der TC4427A von Microchip verwendet und verstärkt das PWM-Ausgangssignal auf die erforderliche Ansteuerspannung.

Alle unbedingt notwendigen Steuer- und Messleitungen sind nun festgelegt. Um die Steuerung des Aufwärtswandlers aber wirklich realisieren zu können, müssen weitere Komponenten in die bisherige Schaltung eingebaut werden.

5.3.5 RS232 – DS275

Alle weiteren Teile der kompletten Schaltung sind zur Kommunikation und direkten Programmierung des PIC16F88 notwendig. Diese Bauteile und Schnittstellen sind also nicht mehr unbedingt für die korrekte Steuerung des Aufwärtswandlers nötig, erleichtern aber den Umgang und die Fehlersuche enorm.

Die erste Komponente der kompletten Schaltung ist die serielle Schnittstelle, die eine Datenübertragung der Messwerte vom PIC zum PC ermöglicht. Zwei Pins des PIC16F88 sind die RX (RB2) und die TX-Leitung (RB5); sie sind über einen Transceiver-Baustein von Dallas Semiconductor mit der Schnittstelle verbunden. Die RS232-Schnittstelle benötigt Spannungen von ±3 V bis ±15 V, der PIC sendet und empfängt Spannungen von 5 V und 0 V. Der so genannte DS275 ist ein 8-Pin RS232-Transceiver-Chip, der die Spannungen der RS232-Schnittstelle in Logic Level wandelt (5 V/0 V). Der DS275 ist kostengünstig und wurde für das Diplomprojekt von Dallas Semiconductor als Sample verschickt. Er wurde für den MPPT gewählt, da er line-powered arbeitet, das heißt der Chip kann für die Sendeleitung die nötige Spannung von der Empfangsleitung über den PC entnehmen. Dies erfolgt durch eine ausgeklügelte einzigartige Schaltung im IC, die es ermöglicht, dass die Sendeleitung des Chips die Versorgung von seiner Empfangsleitung „stiehlt“. Diese Eigenschaft funktioniert solange die Sendeleitung auf Marking-Pegel ist, was bei standardmäßiger serieller Übertragung über einen Großteil der Verbindungszeit der Fall ist, z.B. in allen Wartepausen, wenn keine Datenübertragung erfolgt. Somit muss der DS275 nur kurzzeitig von seiner eigenen Versorgungsleitung Strom ziehen. Dadurch ist dieser Transceiver-Bauteil sehr sparsam. Die einzige Beschränkung liegt darin, dass er keine wirkliche voll-duplexe Übertragung ermöglicht. Außerdem kann es sein, dass der DS275 während der Datenübertragung nicht immer die Normpegel der RS232 einhält. Allerdings sind die Abweichungen so gering, dass fast alle Geräte die Signale richtig lesen können. Da der PIC beim Step-Up Converter allerdings nur Messwerte senden

muss, reicht eine halb-duplexe Datenübertragung über die serielle Schnittstelle vollkommen aus.

5.3.6 ICD2 & Sonstiges

Eine weitere Komponente ist die ICD2-Schnittstelle, die uns das Programmieren des PICs in der eingebauten Schaltung ermöglicht. Weiters kann man mit Hilfe des ICD2-Steckers den PIC mit dem PC verbinden und debuggen. Das heißt, es gibt eine Möglichkeit, die einzelnen Programmschritte über den PC zu kontrollieren und dabei eventuelle Softwarefehler leichter aufzufinden. Der ICD2-Stecker hat fünf Pins, wobei je einer für Masse und Versorgung dient, alle drei weiteren Anschlüsse müssen direkt mit dem PIC verbunden werden.

Nach Abschluss der Schaltungsentwicklung bleibt noch ein PIN frei. Dafür eignet sich besonders der RB0 als Interrupt-Pin. An diesem Pin könnte noch ein Schalter für eventuelle Erweiterungen der MPPT-Schaltung angeschlossen werden.

Der Schaltplan befindet sich im Anhang G.

5.4. Platinenlayout

5.4.1 Layout

Nach dem Fertigstellen des vollständigen Schaltplans in Eagle konnte man mit dem Erstellen des Leiterplattenlayouts starten. Mit der verwendeten Zeichensoftware Eagle ist es möglich, direkt aus dem Schaltplan in den Layoutmodus zu wechseln. Der Schaltplan wird gespeichert und ab diesem ersten Umschalten sozusagen „verlinkt“ mit dem Layout. Somit werden alle nachträglichen Änderungen in der Schaltung schnell und einfach im Leiterplattendesign mit geändert. Hauptaufgabe beim Leiterplattendesign ist es, die entworfene Schaltung für die spätere Fertigung auf einer Leiterplatte abzubilden. Man muss dabei immer bedenken, dass auch die beste Schaltung bei falschem Platinendesign funktionsuntüchtig sein kann, da verschiedenste Arten von Leitungen auf so kleinem Raum enorme Störungen und Fehlwirkungen erzeugen können. Dazu werden im Anhang die allgemeinen Design-Regeln zum Layoutentwurf erklärt (siehe Anhang G), in diesem Kapitel folgt die Beschreibung der Spezialitäten der MPPT-Leiterplattenentwicklung.

Hauptaugenmerk beim Design der MPPT-Schaltung gilt der Verlegung der pulsweitenmodulierten (PWM) Signalleitungen, die direkt, kurz und kreuzungsfrei verlegt werden müssen. Die Messleitungen für Strom- und Spannungsmessung wurden ebenfalls kurz und störungsfrei verlegt, um grobe Messfehler vermeiden zu

können. Für die Maximum Power Point Tracker-Schaltung wurde eine Europlatine mit den Abmaßen 160 mm x 100 mm ausgewählt, denn bei dieser Größe bleibt Platz für alle Leiterbahnen, große Bauteile wie Spule und Kondensatoren und auch für Kühlkörper. Die Kupferbeschichtung von 70 µm ist dicker als bei den meisten Standardplatinen, man kann dafür aber besser mit den hohen Strömen arbeiten. Alle Leitungen des Step-Up Converters müssen höhere Ströme und Leistungen aushalten und es werden Leiterbahndicken von bis zu 4 mm Stärke verwendet. Weiters soll der Leistungsstromkreis keine unnötigen Umwege beinhalten und daher immer den kürzesten Verbindungsweg verfolgen. Die Klemmleisten befinden sich am Rand, die 844 µH Spule ist aufgrund der Größe sehr platzaufwendig und es musste ein genügend großer Freiraum eingeplant werden. Ein bedrahteter 1 mF Kondensator befindet sich am Eingang des Step-Up Converters, die beiden anderen beim Ausgang. Dazwischen mussten im Layout die Schottky-Diode und die beiden BUZ102-Transistoren so eingebaut werden, dass alle drei Teile im TO-220 Gehäuse an einem gemeinsamen Kühlkörper befestigt werden können.

Im nächsten Schritt wurde die Strom- und Spannungsmessung am Schaltungseingang eingeplant. Am wichtigsten und besonders aufwendig ist dabei das richtige Design der Strommessung mit allen Widerständen und Kondensatoren rund um den IC MAX472. Ein 5 mΩ Messwiderstand wird im Stromkreis des Step-Up Converters eingebaut. Vom Messwiderstand führen zwei kurze und unbedingt gleichlange (!!) Leitungen über die Vorwiderstände direkt zu den Messeingängen des ICs. Weiters wichtig ist eine eigene dicke Verbindungsleitung vom Aufwärtswandler-Eingang zum IC, welche für den MAX472 als Versorgungsleitung benötigt wird. Da das Layout sowohl für den MAX472 (Strommessungen bis 10 A) als auch für den MAX471 (Strommessungen bis 3 A) ausgelegt wurde, befinden sich noch weitere Widerstände im Umfeld des ICs, die aber je nach Bauteilauswahl verschiedene Werte besitzen (teilweise 0 Ω-Widerstände und manche Pads werden nicht bestückt). Alle Leitungen wurden manuell nach den beschriebenen Voraussetzungen verlegt. Die Leiterbahnen haben großteils eine Dicke von 0,04 inch = 1,016 mm, nur die Verbindungen von den Bauteilen in den SO-8 Gehäusen (MAX472, DS275) sind mit 0,016 inch = 0,4064 mm noch dünner.

Am Layout wurden zum Schluss mehrere GND-Flächenbereiche für die Leistungsteile und die ICs separat erstellt und nur durch einzelne Verbindungen am GND-Sternpunkt am Eingangskondensator miteinander verbunden. Nach der Verlegung aller Leiterbahnen und dem Erzeugen von brauchbaren GND-Flächen wurde das Layout auf Papier gedruckt, um Fehler zu korrigieren, Leitungslängen zu optimieren und die Dicke von Bahnen weiter zu erhöhen. Das für die Schaltung verwendete Layout zeigen die Abbildungen 56 und 57.

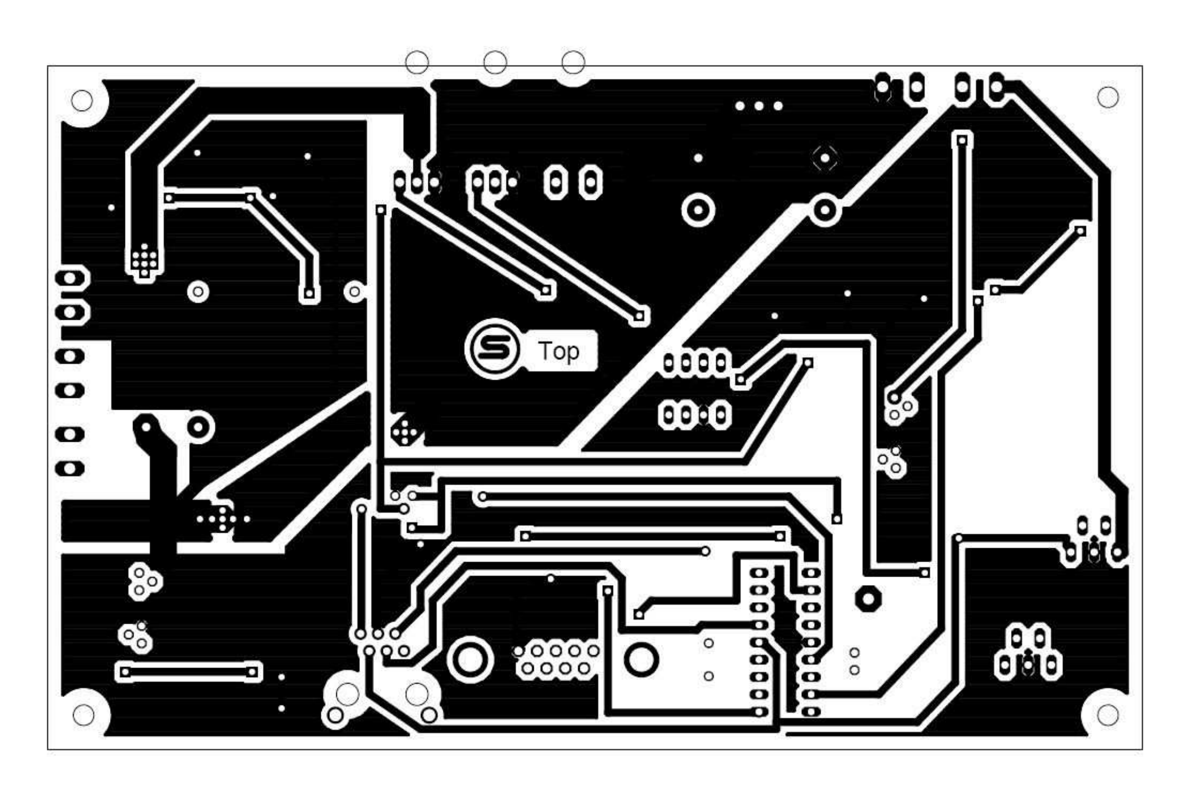


Abb. 56 Layout Top

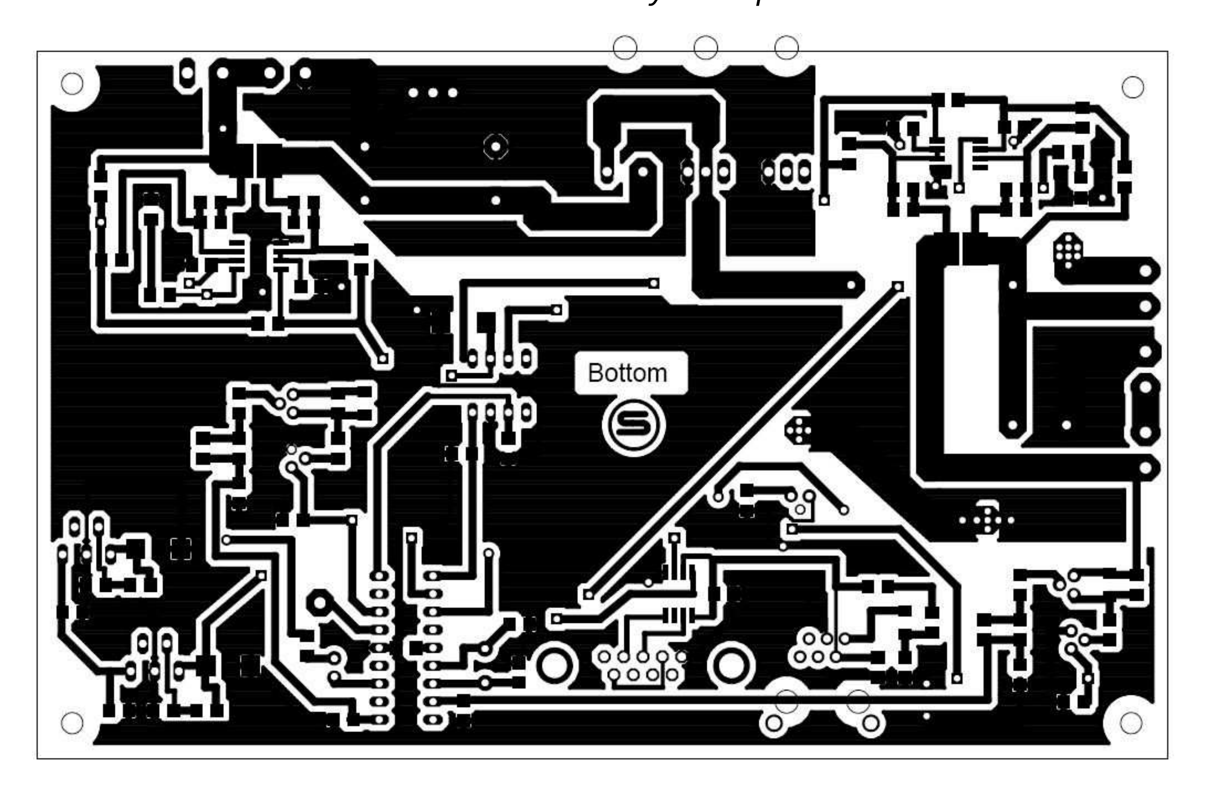


Abb. 57 Layout Bottom

5.4.2 Fertigung der Leiterplatte

Bei der Fertigung der Leiterplatte musste in der Elektronik-Werkstätte zu allererst das Layout vom PC auf geeignete Folien gedruckt werden. Es wurden Laserdruckerfolien verwendet und das Layout ist zentriert platziert worden, um die Verzerrung des Druckes zu minimieren. Beide Platinenseiten musste man zweimal drucken, um die notwendige Lichtundurchlässigkeit des Ausdrucks zu erhalten. Danach wurde eine geeignete „Tasche“ zum Belichten angefertigt. Zweifacher Ausdruck deshalb, da im ersten Versuch die Belichtung schlecht war, das heißt der Kontrast zwischen Leiterbahnen und dem Rest war nicht stark genug. Zwei Folien pro Seite minimieren die Fehler beim Belichten, die Leiterplatte wird dabei an den Ecken in die Tasche geklebt um Verrutschen bei der Fertigung zu verhindern. Die ideale Belichtungszeit beträgt ca. acht Minuten bei Verwendung des fotolackvorbeschichteten Rohmaterials von Conrad.

Nach dem Entwickeln wurde die Leiterplatte im Ätzbad ca. 25 – 30min behandelt; den genauen Zeitpunkt für das Entnehmen aus dem Ätzbad muss man gegen Ende ständig kontrollieren und selbstständig entscheiden. Sobald alle Leiterbahnen optimal erkennbar sind, d.h. es gibt keine Kurzschlüsse zwischen verschiedenen Leiterbahnen oder Flächen, wird die Leiterplatte entnommen und abgespült. Danach wurden alle Durchgangslöcher mit einem ∅ 0,9 mm Bohrer gebohrt, für die Klemmen und die Spulenanschlüsse musste ein ∅ 1 mm Bohrer verwendet werden.

Abschließend wurden beide Seiten hintereinander mit Lötlack besprüht und danach je 40 Minuten pro Seite im Ofen getrocknet. Dadurch war die Leiterplatte für die Bestückung und anschließende Tests vorbereitet. Die Bestückung wurde in mehreren Schritten durchgeführt, um die Komponenten in der Leiterplatte testen zu können. Abschließend wurde die PIC-Software in der fertigen Platine durchgetestet und erweitert. Die Abbildungen 58 und 59 zeigen die fertige Leiterplatte mit den ersten bestückten Bauteilen.

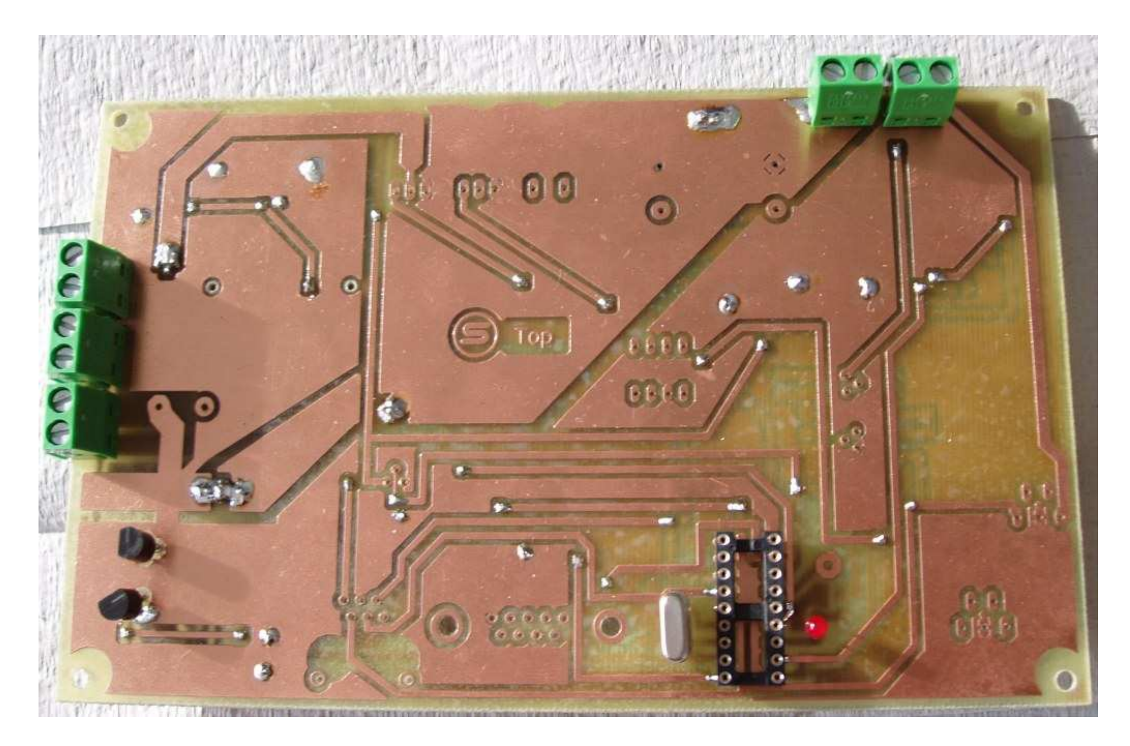


Abb. 58 Platine Top

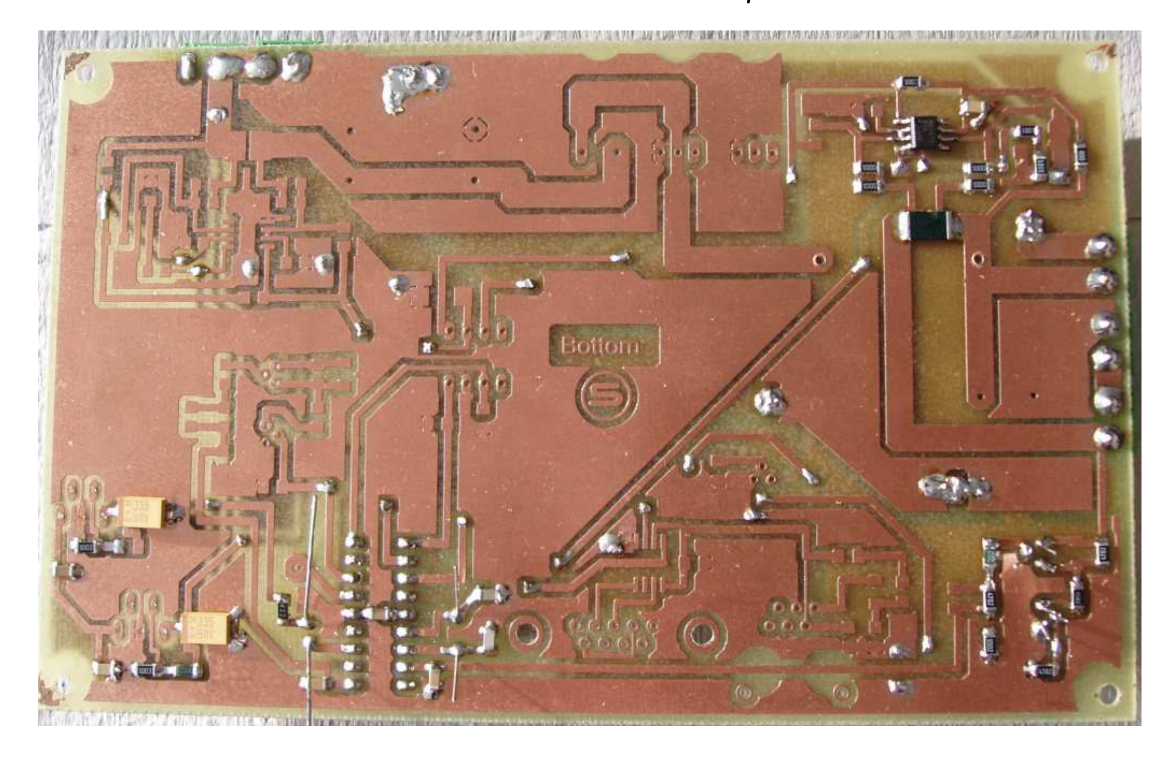


Abb. 59 Platine Bottom

5.4.3 Schrittweise Inbetriebnahme der Leiterplatte

Das Bestücken der fertigen Leiterplatte musste wieder in einzelnen Baugruppen erfolgen, um Kontrollen durchführen zu können. Vor dem Einbau von elektrischen Bauteilen konnten alle Durchkontaktierungen mittels Draht realisiert werden. Danach

wurden zuerst wichtige Komponenten zum Testen, wie die 18-Pin PIC-Halterung, der ICD2-Stecker, der Quarz und die Betriebsleuchtdiode eingelötet. Danach konnten mit der LED und einfachen PIC-Programmen Teile der Schaltung überprüft werden. Die Kontrolle bestand zuerst aus optischer Kontrolle, das heißt es wurde geprüft ob auch alle Bauteile sichtbar richtige Kontakte zur Leiterbahn hatten und keine kalten Lötstellen vorhanden waren. Weiters mussten Leiterbahnen mit dem Durchgangsprüfgerät kontrolliert werden, um alle zum Test notwendigen Leitungen auch verwenden zu können. Abschließend wurde mit einem PIC-Programm die Betriebs-LED aktiviert und das Debuggen beziehungsweise Programmieren über den schaltungseigenen ICD2-Stecker getestet.

Weitere Schritte waren der Einbau der Spannungsregler für 5 V und 12 V mit den entsprechenden Einstell-Widerständen und einer Spannungsmesskomponente. Die Spannungsregler mussten konstant die gewünschte Versorgungsspannung am Ausgang liefern können, die Erwärmung auf Grund der Last wurde ebenfalls überprüft. Nach dem erfolgreichen Bestehen des Tests wurde die Spannungsmesseinrichtung am Eingang aktiviert. Die Freischaltung der Messung, die im Betrieb über einen PIC-Ausgang realisiert wird, musste durch eine passende Drahtbrücke simuliert werden. Danach konnte am gewünschten PIC-Eingang die Messspannung mit dem Multimeter ausgelesen werden. Mit den passenden Ergebnissen konnte die Funktionstüchtigkeit der Spannungsmesskomponente bestätigt werden. Ab nun war die Bestückung der zweiten Spannungsmessung am Step-Up Converter Ausgang sinnvoll.

Die nächste Stufe der Bestückung der Leiterplatte beschäftigte sich mit der Strommesskomponente. Dafür mussten eine komplette Beschaltung des MAX472 und der richtige Einbau des BSS89-Transistors auf der Shutdown-Leitung bereits erfolgt sein. Im Test wurde der Messstrom mit dem Netzgerät und einem passenden Widerstand eingestellt, die umgewandelte Ausgangsspannung für den PIC-Eingang konnte wieder über das Multimeter entnommen und ausgewertet werden.

Weiters interessant war der Einbau der RS232 Schnittstelle mit dem Transceiver-IC DS275. Mit der fertigen Bestückung der seriellen Schnittstelle wurden mit Hilfe des PICs die gemessenen Strom und Spannungswerte in Hex-Code zum PC übertragen. Nach positiver Auswertung wurde die Leiterplatte abschließend nach Plan fertig bestückt und gelötet.

Nachdem letzte optische Kontrollen an der fertig bestückten Leiterplatte vorgenommen wurden, musste ab nun der Programmablauf der MPPT-Regelung getestet werden. Die Eingangsspannung wurde in der Testphase mit einem Solarpanel simuliert, ansonsten waren alle anderen Leiterplattenkomponenten fertig.

Das Solarpanel wurde von unserem Betreuer DI Martin Meschik zur Verfügung gestellt und hat folgende Kenndaten:

Solarpanel „Sunline Solarmodul MAP 50“:

Maximale Leistung	50 W
Kurzschlussstrom	3,1 A
Nennstrom	2,81 A
Nennspannung	17,1 V
Leerlaufspannung	21,1 V
Umgebungstemperatur	-40 ℃ bis +85 ℃
Gewicht	6,2 kg
Abmaße (L x B x H)	995 x 450 x 35 mm

Tests mit dem Solarpanel

Die Tests mit dem Solarpanel wurden ausgeführt, um etwaige Fehler im Programm zu beheben und weiter zu optimieren. Das Programm, welches genauer in Kapitel 5.5 erklärt wird, wurde mittels ICD2 im Debugg-Modus betrieben, um so die Fehler Schritt für Schritt auszubessern.

Das Solarpanel wurde ausschließlich zum Korrigieren von grundsätzlichen Fehlern in der Regelung verwendet, die Feineinstellung der Elektronik konnte allerdings nicht mit dem Solarmodul abgeschlossen werden. Grund dafür ist das unterschiedliche Verhalten zwischen dem Solargenerator und einer Windkraftanlage. Die folgenden Grundlagen zum Solarpanel dienen daher zum besseren Verständnis der Testphase im Schullabor.

Ein einfaches Solarmodul besteht aus einer Kunststoffschicht mit den eingebetteten Solarzellen, welche elektrisch miteinander verbunden sind. Das Ganze wird durch eine Glasscheibe geschützt und befindet sich in einem Montagerahmen.

> Ein Solarmodul oder Solargenerator ist eine Anwendung der Fotovoltaik und wandelt Strahlungsenergie in elektrische Energie um und enthält als wichtigstes Bauelement mehrere Solarzellen [WIKI2006].

Man kann Solarzellen zu großen Anlagen zusammenschließen und gemeinsam betreiben, für die Testphase wurde die „Sunline Solarmodul MAP 50“-Anlage verwendet werden.

Der wichtigste Aspekt für die Testphase war das unterschiedliche Verhalten des Solarpanels im Gegensatz zum Rotor. Die Leistung des Solarmoduls hängt von der Sonneneinstrahlung ab. Die Sonneneinstrahlung im Schulhof war ziemlich konstant, das heißt, die Regelung musste sich nur auf geringe Änderungen einstellen. Wurden Teile der Solarzellen zu Testzwecken abgedeckt, bricht die Spannung aber

sekundenschnell sehr stark ein, die Regelung musste sich sofort neu einstellen. Den verwendeten Testaufbau mit dem Solarpanel zeigt die Abbildung 60.



Abb. 60 Tests mit dem Solarpanel

Beim Savoniusrotor treten auf Grund von Windböen und Windgeschwindigkeitsänderungen fast nie konstante Eingangswerte auf. Der Maximum Power Point Tracker musste laufend nachstellen, ein plötzlicher Spannungseinbruch ist dagegen beim Windrad kaum möglich. Daher lieferte die passende Einstellung des MPPT vom Solarpanel, am Rotor schlechte Ergebnisse. Andererseits konnte die träge Regelung für den Rotor am Solarmodul nicht den Maximum Power Point finden.

5.4.4 Verbesserungen an Schaltplan und Layout:

Während des Aufbaus und der Fertigung der Leiterplatte mit dem geplanten Layout konnten noch Optimierungsmöglichkeiten entdeckt werden.

Da für die Transistoren des Typs BSS89 eine falsche Pinbelegung in Eagle eingestellt wurde, mussten als Folge daraus alle Bauteile dieses Typs um 60° verdreht eingebaut werden. Für die Schaltungsfunktion änderte sich dadurch nichts, abschließend wurde das korrekte Layout entworfen, mit der korrigierten Version kann man die BSS89 wie dargestellt einbauen. Das optimierte Layout können Sie den Abbildungen 82 und 83 in Anhang G entnehmen.

Weiters wurden unnötiger Weise drei gleiche 47 kΩ Widerstände als Pull-down Widerstände für die BSS89 Transistoren eingebaut. In diesem Fall reicht ein Widerstand vollkommen aus, mit einem einzelnen hochohmigen Widerstand kann man sogar die Verluste verringern. Diese Änderung erkennt man im korrigierten Schaltplan und im Layout Abbildung 82 und 83 in Anhang G.

Alle Änderungen wurden in einer fortgeschrittenen Fertigungsphase der Leiterplatte durchgeführt, somit entspricht die tatsächlich eingesetzte MPPT-Leiterplatte den alten Schaltplan und Layout Versionen. Für eine neue Fertigung oder den Nachbau sind die optimierten Schaltpläne und Layouts zu empfehlen.

5.5. Programm

5.5.1 Aufgaben

Der PIC-Mikrokontroller hat die Aufgabe, den Step-Up Converter so zu regeln, dass dieser möglichst nahe am Maximum Power Point bleibt, indem er den Schalttransistor mit einer Puls-Weiten-Modulation (PWM) ansteuert. Das Programm muss dazu feststellen, ob eine Veränderung der Einschaltdauer einen positiven oder negativen Effekt in Bezug auf das Leistungsergebnis erzielt. Basierend auf diesem Ergebnis erhöht oder verringert das Programm die Einschaltdauer des Transistors, um die Leistung zu maximieren. Da sich der Savoniusrotor nicht innerhalb kürzester Zeit an eine Laständerung anpassen kann, das Programm jedoch sehr schnell abgearbeitet sein würde, muss daher eine Verzögerung eingebaut werden, um diese Trägheit zu berücksichtigen und dem Rotor mehr Zeit zur Anpassung zu lassen.

Der Step-Up Converter ist nicht kurzschlussfest, daher muss das Programm dieses Problem berücksichtigen und verhindern. Es darf nur eine Einschaltdauer von 0 % - 90 % zulassen. Der durch den Savoniusrotor betriebene Gleichstromgenerator ist auf 2,5 A ausgelegt. Ist allerdings ausreichend Wind vorhanden, würde er auch mehr Strom liefern. Eine solche Überbelastung der Spulenwindungen würde der Generator jedoch nicht lange verkraften. Daher wird in dem Regelungsprogramm auch eine Überwachung des Eingangsstromes vorgenommen, um sicher zu gehen, den Generator nicht zu überhitzen.

Ebenso wird für die Ausgangsspannung ein Maximalwert festgelegt, da die Akkumulatoren nur über eine begrenzte Ladungskapazität verfügen. Ist diese erreicht, darf keine weitere Energie an den Ausgang übertragen werden, da es sonst zu schweren Schäden der Akkumulatoren und in Folge auch der Maximum Power Point Tracker-Schaltung kommen kann. Daher wird für diesen Fall ein Bremswiderstand eingesetzt. Dieser ist dazu in der Lage, die gesamte Leistung aufzunehmen und in Wärme umzuwandeln.

Außerdem ist in dem Programm auch eine Routine eingebaut, die es erlaubt, die Messwerte an den PC zu übertragen, um diese anschließend zu analysieren. Da die Versorgung eines herkömmlichen Pegelwandlers vergleichsweise viel Energie benötigt, wird in dieser Applikation ein besonderer ‚line-powered' Chip eingesetzt. Bei diesem darf die Datenübertragung nur geschehen, wenn der PC an die Schnittstelle angeschlossen ist und die Messwerte auch anfordert.

5.5.2 Hauptprogramm

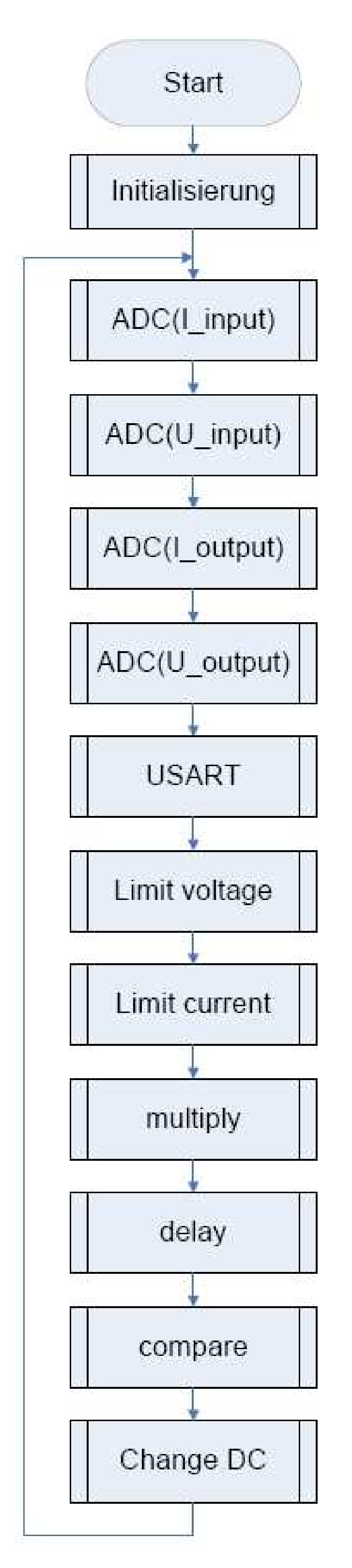


Abb. 61 Haupt-Flussdiagramm

Das Hauptprogramm läuft in einer einfachen Schleife und ruft dabei ein Unterprogramm nach dem anderen auf, die zur Regelung des Step-Up Converters nötig sind. Dies ist im links stehenden Flussdiagramm ersichtlich.

Bei der Initialisierung werden alle wichtigen Module konfiguriert, Initialwerte geladen und die PWM gestartet.

In den nächsten beiden Schritten werden mittels des Unterprogramms ADC(Input) die Strom- und Spannungswerte an der Eingangsseite des Step-Up Converters mit dem Analog-Digital-Converter Modul des PICs eingelesen.

Nun werden auch die Strom- und Spannungswerte der Ausgangsseite in der Routine ADC(Output) eingelesen.

Die Subroutine „USART“ stellt fest, ob ein an die serielle Schnittstelle angeschlossener Computer die Messdaten anfordert, die gegebenenfalls übertragen werden.

Anschließend wir im Unterprogramm „Limit voltage“ überprüft, ob die Gefahr einer Akkumulatorüberladung besteht und das Programm reagiert gegebenenfalls.

In „Limit current“ wird die Belastungsgrenze des Gleichstromgenerators überwacht.

Mit der Subroutine „multiply“ wird aus den eingelesenen Strom- und Spannungswerten der Ausgangsseite die in den Akku gespeiste Leistung berechnet.

Im Unterprogramm „delay“ wird eine Verzögerung verursacht, welche dazu dient die Programmgeschwindigkeit an den Rotor anzupassen.

Das nächste Unterprogramm „compare“ stellt fest, ob der neu berechnete, im Vergleich zum zuletzt berechneten Leistungswert, Gewinn, Verlust oder keine Veränderung bedeutet und bestimmt die Änderung des Tastverhältnisses.

In „Change DC“ wird das Tastverhältnis wie zuvor bestimmt erhöht, verringert oder gleich belassen.

Anschließend springt das Programm wieder zum Einlesen der Strom- und Spannungswerte und läuft von neuem durch.

5.5.3 Unterprogramme

ADC

Im Unterprogramm der Analog-Digital-Wandlung wird auf Grund der vom Hauptprogramm übergebenen Parameter der gewünschte Analogwert (Eingangs-/Ausgangswerte) eingelesen. Die Steuerleitung, welche die Transistoren zur Spannungsmessung durchschaltet und den MAX472 zur Strommessung aktiviert, wird bereits im Hauptprogramm auf High gesetzt. Mit den übernommenen Parametern wird der Analog-Channel und damit der gewünschte Ein- bzw. Ausgangswert festgelegt. Nun wird die acquisition time zum Laden der Kapazitäten abgewartet und die Wandlung eingeleitet. Erst nachdem die Wandlung abgeschlossen ist, wird das Ergebnis an das Hauptprogramm zurückgegeben.

limit_voltage

In diesem Unterprogramm wird die Ausgangsspannung überwacht, damit die Akkumulatoren nicht überladen und so Schäden verursacht werden. Hierfür wird der am Ausgang eingelesene Analogwert der Spannung zum Vergleich herangezogen. Dazu wird zunächst der Wert der Ausgangsspannung in das Working-Register geschrieben und anschließend vom Maximalwert „peak_voltage“ abgezogen. Anschließend kann anhand des Carry-Bits im STATUS Register festgestellt werden welcher Wert höher ist. Da es sich hier um eine Subtraktion handelt und der PIC-Mikrokontroller diese intern durch eine Addition des Zweierkomplements durchführt, wird das Carry-Bit zum Borrow-Bit. Es gilt die invertierte Logik.

Beispiel:

```
60 – 40 = ?                  ;256 – 40 = 216     complement on two
60 – 40 = 60 + 216 = 276
276 = 0x114                  ; 276 > 255 → overflow, Carry is set
```

Durch die einfache Abfrage *Bit Test File and Skip if Set* (BTFSS) kann zu der nötigen Programmverzweigung gesprungen werden. Überschreitet nun die Ausgangsspannung den eingestellten Maximalwert, wird das Tastverhältnis zur Steuerung des Transistors auf Null gesetzt und so der Ausgang des Step-Up Converters gesperrt, um keine weitere Leistung an die Akkus zu übertragen. Außerdem wird der Bremswiderstand zugeschaltet, der dadurch die Leistung des Eingangs aufnimmt, in Wärme umwandelt und so die Schaltung schützt.

Fällt die Spannung am Ausgang, also die Akkuspannung, wieder unter den Grenzwert, wird der Bremswiderstand wieder weg geschaltet und das PWM-Tastverhältnis kann geändert werden.

Programmcode: limit_voltage

```
;******* Voltage Limit **********************************
limit_voltage
   NOP                          ;compares output voltage and
   MOVF     Uout,W              ;the allowed maximum voltage
   SUBWF    peak_voltage,W      ;W = peak_voltage - Uout
   BTFSS    STATUS,C            ;if Uout is bigger skip next
   GOTO     too_high_v          ;
   GOTO     past_schon_v        ;
too_high_v                      ;if output Voltage is too high
   NOP                          ;
   MOVLW    0x00                ;the duty cycle of the PWM is
   MOVWF    CCPR1L              ; shut down and the
   BSF      PORTB,RB4           ; break resistor is activated
   GOTO     main
past_schon_v                    ;if the output voltage is ok
   BCF      PORTB,RB4           ;the breakresistor is deactivated
   NOP
   RETURN
```

Der Maximalwert „peak_voltage“ für den Vergleich der Spannung ist in der Initialisierung definiert und kann dort einfach geändert werden. So ist es leicht

möglich, mit dem Programm nicht nur 24 V sondern z.B. auch 12 V Akkumulatoren zu laden.

Die passenden Werte der AD-Wandlung für bestimmte Grenzwerte lassen sich folgendermaßen berechnen:

$$30{,}45V \cong 255$$

$$27{,}6V \cong \frac{255}{30{,}45V} \cdot 27{,}6V = 231 \rightarrow 0xE6$$

$$13{,}8V \cong \frac{255}{30{,}45V} \cdot 13{,}8V = 116 \rightarrow 0x73$$

limit_current

„limit_current" dient zur Überwachung des Eingangsstromes. Dieser darf ebenfalls einen eingestellten Maximalwert nicht überschreiten. Die Subroutine läuft ähnlich der „limit_voltage" Routine ab. Nur wird in dieser das Tastverhältnis der PWM nicht komplett auf Null gesetzt, sondern nur um eins reduziert und der Bremswiderstand wird nicht verwendet. Dieser Maximalwert für den Eingangsstrom ist so definiert, dass ein bestimmter Stromwert nicht überschritten wird, um den Gleichstromgenerator am Eingang nicht zu sehr zu belasten und dadurch zu zerstören.

Da die Strommessung über den IC MAX472 durchgeführt wird, muss folgende Formel zur Berechnung des Stromwertes verwendet werden:

$$10A \cong 250$$

$$2{,}5A \cong \frac{250}{10A} \cdot 2{,}5A = 62{,}5 \rightarrow 0x3C$$

Dieser Stromwert ist in der Initialisierung definiert und passend für den Generator auf 2,5 A eingestellt.

multiply

In der „Multiply" Routine wird ausschließlich der neue Leistungswert berechnet. Dazu werden die neu eingelesenen Strom- und Spannungswerte an der Ausgangsseite des Step-Up Converters, welche in den Akku geladen werden, durch eine Reihe von Schiebe- und Additionsbefehlen binär miteinander multipliziert und das 16-Bit Ergebnis in zwei 8-Bit Register gespeichert.

delay

Der kurze Programmteil „delay“ sorgt für die nötige Zeitverzögerung zwischen den einzelnen Änderungen des PWM-Tastverhältnisses. Da das Programm etwa 20 Millisekunden zum Durchlaufen benötigt, wird in diesem Programmteil dafür gesorgt, dass die Änderungsroutinen nur bei jedem 5ten Durchlauf ausgeführt werden. Dazu wird eine Variable mit dem Dezimalwert 4 geladen und bei jedem Programmdurchlauf um eins verringert. Hat sie den Wert Null, wird sie neu mit Dezimalwert 4 geladen und die Änderungsroutinen werden ausgeführt.

Programmcode: delay

```
;******* delay **********************************
   DECF    delayer
   BTFSS   STATUS,Z
   goto    main

   MOVLW   .4                 ;load delayer 4 for 5 skips
   MOVWF   delayer
```

compare

In diesem Unterprogramm wird dafür gesorgt, dass der Step-Up Converter möglichst optimal betrieben wird, also der Maximum Power Point verfolgt wird. Es wird festgestellt, ob das Tastverhältnis der PWM erhöht, verringert oder gleich bleiben soll und damit der Savoniusrotor mehr, weniger oder gleich belastet wird. Zum besseren Verständnis dient die nebenstehende Abbildung 62. Dem Programm steht in den Registern „P0_H“ und „P0_L“ der alte und in „H_byte“ und „L_byte“ der neue Leistungswert, berechnet durch die anderen Unterprogramme, zu Verfügung.

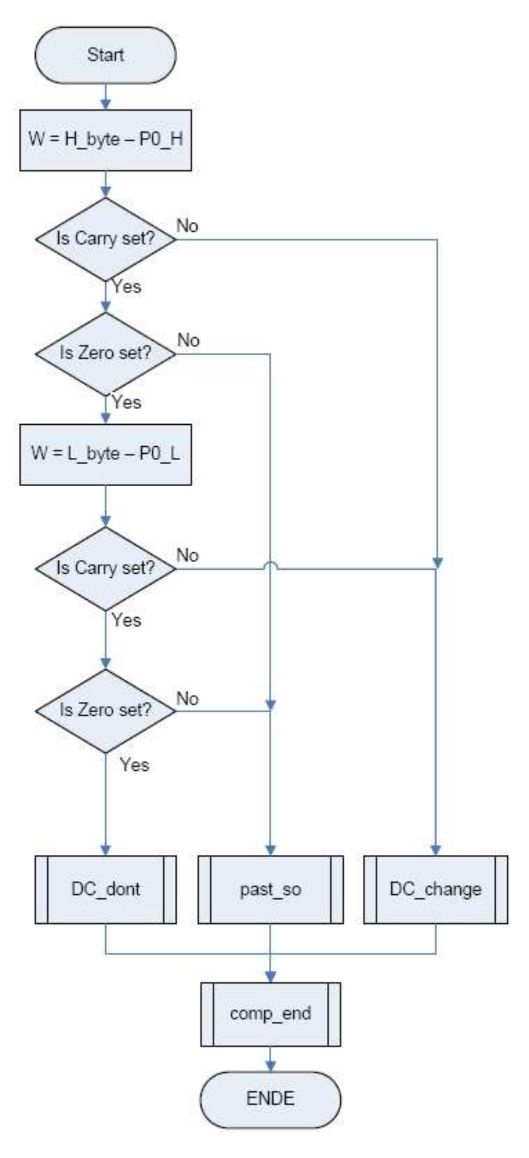


Abb. 62 Flussdiagramm für „compare“

Zunächst werden die beiden höherwertigen Bytes (P0_H und H_byte) miteinander verglichen. Dabei wird zunächst „P0_H“ in das Working-Register (W-Reg) geladen, und anschließend vom „H_byte“ subtrahiert. Danach kann, wie bereits im Programm „limit_voltage“ erklärt, anhand des Carry-Bits im STATUS Register festgestellt werden ob der alte Wert in „P0_H“ größer ist. Ist „P0_H“ größer, erkennbar an dem nicht gesetzten Carry-Bit, springt das Programm zu „DC_change“. Da die Änderung des Tastverhältnisses die Leistung verringert hat, wird das ccp_flag Bit invertiert, um die Änderung des Tastverhältnisses umzukehren. Außerdem wird auch das dcd_flag gesetzt um zu wirken, dass eine Änderung durchgeführt wird.

Mit dem Carry-Bit kann allerdings nicht festgestellt werden, ob die Werte gleich sind, da es auch in diesem Fall zu einem Überlauf kommt. Aus diesem Grund wird anschließend das Zero-Bit mit BTFSS abgefragt. Ist es nicht gesetzt also Null, sind die Zahlen unterschiedlich und damit steht fest, dass der neue Leistungswert höher ist.

Daher wird zu „past_so“ gesprungen, wo nur das dcd_flag gesetzt wird um zu bestätigen, dass das Tastverhältnis geändert werden soll. Falls das Zero-Bit gesetzt

ist, sind die beiden höherwertigen Bytes der Leistungswerte gleich und es müssen auch die niederwertigen Bytes für einen eindeutigen Vergleich herangezogen werden.

Bei diesen wird gleich wie bei ihren Vorgängern verfahren: Zunächst wird „P0_L“ von „L_byte“ abgezogen und das Carry-Bit getestet. Ist dieses Null wird zu „DC_change“ gewechselt. Andernfalls wird auch das Zero-Bit abgefragt, um endgültig zu bestimmen, ob der gesamte alte Wert kleiner (bei Zero = 0) oder gleich groß (bei Zero = 1) dem neuen Wert ist. Sind die Werte gleichgroß, wird das dcd_flag Bit gelöscht, um eine Änderung des Tastverhältnisses zu verhindern. Zuletzt werden die alten mit den neuen Leistungswerten überschrieben, um sie für den nächsten Vergleich zu sichern.

Programmcode: compare

```
;******* compare **********************************
compare
   NOP
   BCF      STATUS,RP0          ;select Bank 0
   BCF      STATUS,RP1          ;select Bank 0
   MOVFW    P0_H
   SUBWF    H_byte,W            ;W = H_byte - P0_H
                                ;Subtraction!  C-Bit  ->  B-Bit
                                ; inverse Logic
   BTFSS    STATUS,C            ;if H_byte is bigger skip next
   GOTO     DC_change
   BTFSS    STATUS,Z            ;test   if   H_byte = P0_H   and
                                ; skip next if it is
   GOTO     past_so
   MOVFW    P0_L
   SUBWF    L_byte,W            ;W = L_byte - P0_L
   BTFSS    STATUS,C            ;if L_byte is bigger skip next
   GOTO     DC_change
   BTFSS    STATUS,Z            ;test   if   L_byte = P0_L   and
                                ; skip next if it is
   GOTO     past_so
   GOTO     DC_gar
DC_change
   MOVFW    toggler             ;toggles the bit that defines
```

```
   XORWF   marker,f            ;the change of the duty cycle
   BSF     marker,dcd_flag
   GOTO    comp_end            ;because power was decreased
past_so                        ;direction is not changed
   nop                         ;because power was increased
   BSF     marker,dcd_flag
   GOTO    comp_end
DC_gar                         ;nothing is changed because
   nop                         ; this is the MPP
   BCF     marker,dcd_flag
   GOTO    comp_end
comp_end
   MOVFW   H_byte              ;save High register of
                               ; power result
   MOVWF   P0_H
   MOVFW   L_byte              ;save LOW register of
                               ; power result
   MOVWF   P0_L
   NOP
   RETURN
```

Change DC

Change DC ist das Unterprogramm, in dem das Tastverhältnis der PWM neu eingestellt wird. Zuerst wird anhand des dcd_flag festgestellt, ob eine Veränderung des Tastverhältnisses nötig ist. Ist dieses Bit nicht gesetzt, wird der Rest der Routine übersprungen. Ist es gesetzt, wird anschließend anhand des ccp_flags überprüft, ob das Tastverhältnis erhöht oder verringert werden soll. In beiden Fällen wird vor der Aktualisierung des Wertes überprüft, ob durch die Änderung ein Überlauf verursacht wird oder der Wert die 90% Grenze (wegen Kurzschlussgefahr) überschreitet. Ist dies der Fall, wird keine Veränderung vorgenommen.

Programmcode: change_DC

```
;*** change_DC ****************************
change_DC
   BTFSS   marker,ccp_flag            ;test flag for operation
   GOTO    increase
   GOTO    decrease
increase                        ;increase duty cycle
   BCF     STATUS,C             ;clears the Carry bit
   MOVFW   CCPR1L               ;copy CCPR1L (the duty cycle)
   MOVWF   CCP_temp             ;in a temporary register
   INCF    CCP_temp,f           ;increase the temporary register
   INCF    CCP_temp,f           ;increase the temporary register
   MOVFW   CCP_temp             ;add decimal 201
   ADDLW   .201                 ;to test for too high duty cycle
   BTFSC   STATUS,C             ;test for overflow
   goto    wweiter
   INCF    CCPR1L,f             ;if it is ok, increase duty cycle
   INCF    CCPR1L,f             ;increase duty cycle
   GOTO    wweiter
decrease                        ;decrease duty cycle
   BCF     STATUS,C             ;clears the Carry bit
   MOVFW   CCPR1L               ;copy CCPR1L (the duty cycle)
   MOVWF   CCP_temp             ;in a temporary register
   MOVFW   CCP_temp
   SUBLW   .1                   ;decrease the temporary register
   BTFSC   STATUS,C             ;test for overflow (0 -> 255)
   goto    wweiter
   DECF    CCPR1L,f             ;if its ok, decrease duty cycle
   GOTO    wweiter
wweiter
   RETURN                       ;returns to main
```

USART

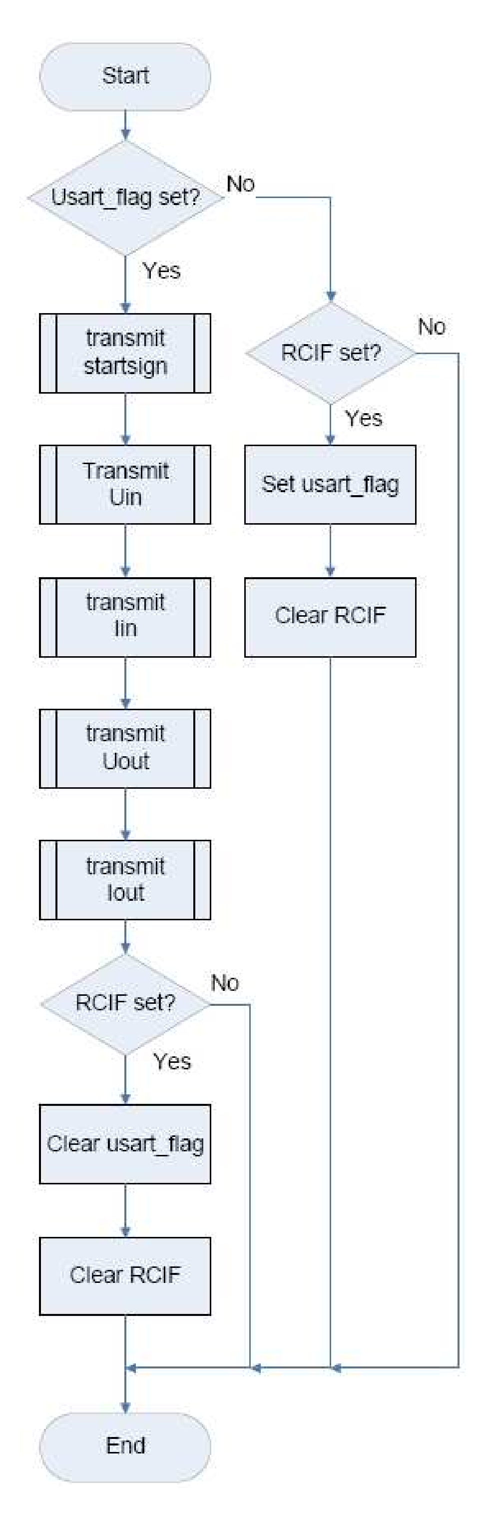


Abb. 63 Flussdiagramm: USART on Demand

Das Programm USART ist dafür verantwortlich festzustellen, ob die Messdaten von einem an die serielle Schnittstelle angeschlossenen PC angefordert werden und diese gegebenenfalls zu übertragen. Es ermöglicht dem PC durch das Senden eines Zeichens die ständige Übertragung zu starten und durch ein weiteres Zeichen wieder zu stoppen. Der Ablauf ist in Abbildung 63 leicht zu erkennen. In der Routine wird zunächst überprüft, ob ein bestimmtes Bit, das „usart_flag“-Bit, welches signalisiert, dass Daten gesendet werden sollen, gesetzt ist. Wenn das Bit gesetzt ist, wird für jeden zu übertragenden Wert eine Sub-Subroutine aufgerufen um die Daten im Hex-Format zu übertragen. Zuerst wird jedoch ein Zwischenzeichen (’0xFF’) gesendet, welches bei den empfangenen Werten ermöglicht zu erkennen um welche Variable es sich handelt. Nach der Übertragung wird durch Testen des Receive Interrupt Flag Bits (RCIF) festgestellt, ob ein Zeichen über das USART Modul, also der Befehl zum Abbruch der Übertragung empfangen wurde. Ist das RCIF Bit also gesetzt, wird das usart_flag Bit gelöscht und durch Auslesen des Receive Register (RCREG) das RCIF Bit gelöscht (dieser Wert wird allerdings nicht benötigt, der Vorgang dient nur zum Löschen des RCIF Bits da dies nicht anders möglich ist). Ist nun beim nächsten Durchlauf der USART Routine das usart_flag Bit gelöscht, wird überprüft ob das RCIF Bit gesetzt ist. Ist dies der Fall, wurde ein Zeichen vom PC empfangen und damit der Befehl zum Start der Datenübertragung gegeben. Es wird das usart_flag Bit gesetzt, damit die Messdaten beim nächsten Durchlauf übertragen werden. Zum Schluss wird das RCIF Bit durch Auslesen des RCREG gelöscht.

6. Messungen

6.1. Aufbau

Nachdem die beiden Komponenten fertig gestellt worden waren, konnten sie nun gemeinsam getestet werden. Erst mit diesen Tests war es möglich, das Programm für den MPPT an den Savoniusrotor anzupassen, weil dieser träger als das Solarpanel ist. Da für den großen Savoniusrotor der kleine Windkanal mit dem BMW-Lüfter nicht ausreichte, musste in der freien Natur getestet werden. Da aber auch an windstillen Tagen getestet wurde, musste auch diesmal der Wind künstlich erzeugt werden. Hierfür wurde der Savoniusrotor auf einen passenden Anhänger gestellt und mit seinen Niederspannseilen ordentlich an dem Fahrzeug befestigt.



Abb. 64 Versuchswagen

Um ausreichend Fahrtwind zu erzeugen und diesen möglicht konstant zu halten, wurde eine lange gerade Strecke benötigt. Als Teststrecke diente ein asphaltierter Feldweg in Edelstal, Burgenland, und wurde während der Versuchszeit abgesperrt.

Zur Aufnahme der Messdaten wurden vier Multimeter, ein Anemometer und ein Drehzahlmessgerät verwendet.

6.2. Messung mit Widerstand

Um eine aussagekräftige Kennlinie über den elektrischen Wirkungsgrad des Savoniusrotors samt Generator zu erhalten, wurde zuerst mit einem 50 Ω Leistungspotentiometer als Last getestet. Mit dem Potentiometer konnte der Rotor verschieden belastet werden, um die Messdaten, Spannung am und Strom vom Generator, aufzunehmen.

Die Tabelle sieht wie folgt aus:

Lastwiderstand	**Drehzahl n**	**Umfangs-geschwindigkeit**	**Wind-geschwindigkeit**	**Schnelllaufzahl**	**Spannung U (Generator)**	**Strom I (Generator)**	**Elektrische Nettoleistung P**	**Luftstromleistung**	**Elektrischer Wirkungsgrad**

Als Last wurden: 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30 und 40 Ω eingestellt. Bei diesen verschiedenen Belastungen wurden die Messwerte des Stroms, der Spannung, der Drehzahl und der Windgeschwindigkeit mehrmals aufgezeichnet. Mit diesen Werten konnten dann die übrigen Variablen berechnet werden. Dafür wurden folgende Formeln verwendet:

$$\text{Umfangsgeschwindigkeit} \quad u = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60}$$ [siehe auch Kapitel 2.3.1]

$$\text{Schnelllaufzahl} \quad \lambda = \frac{v_u}{v_W} = \frac{\text{Umfangsgeschwindigkeit}}{\text{Windgeschwindigkeit}}$$ [siehe auch Kapitel 2.3.3]

$$\text{el. Nettoleistung} \quad P = I \cdot U$$

$$\text{Luftstromleistung} \quad P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1{}^3 \cdot A$$ [siehe auch Kapitel 2.3.1]

$$\text{Wirkungsgrad} \quad c_p = \frac{P}{P_0}$$

Eine vollständige Tabelle mit den aufgezeichneten und berechneten Werten befindet sich in Anhang E.

Mit diesen Daten wurde ein Diagramm erstellt: Auf der x-Achse wird die Schnelllaufzahl aufgetragen. Diese ist abhängig von der Windgeschwindigkeit und der

Umfangsgeschwindigkeit des Rotors und lässt so auf die Last des Rotors schließen. Auf der y-Achse wird der c_p-Wert aufgetragen. Der c_p-Wert ist der Leistungsbeiwert des Savoniusrotors. Er beschreibt das Verhältnis zwischen erzeugter elektrischer Leistung und der im Wind enthaltenen Leistung. Somit stellt das Diagramm vereinfacht das Verhältnis der Last zum c_p-Wert dar.

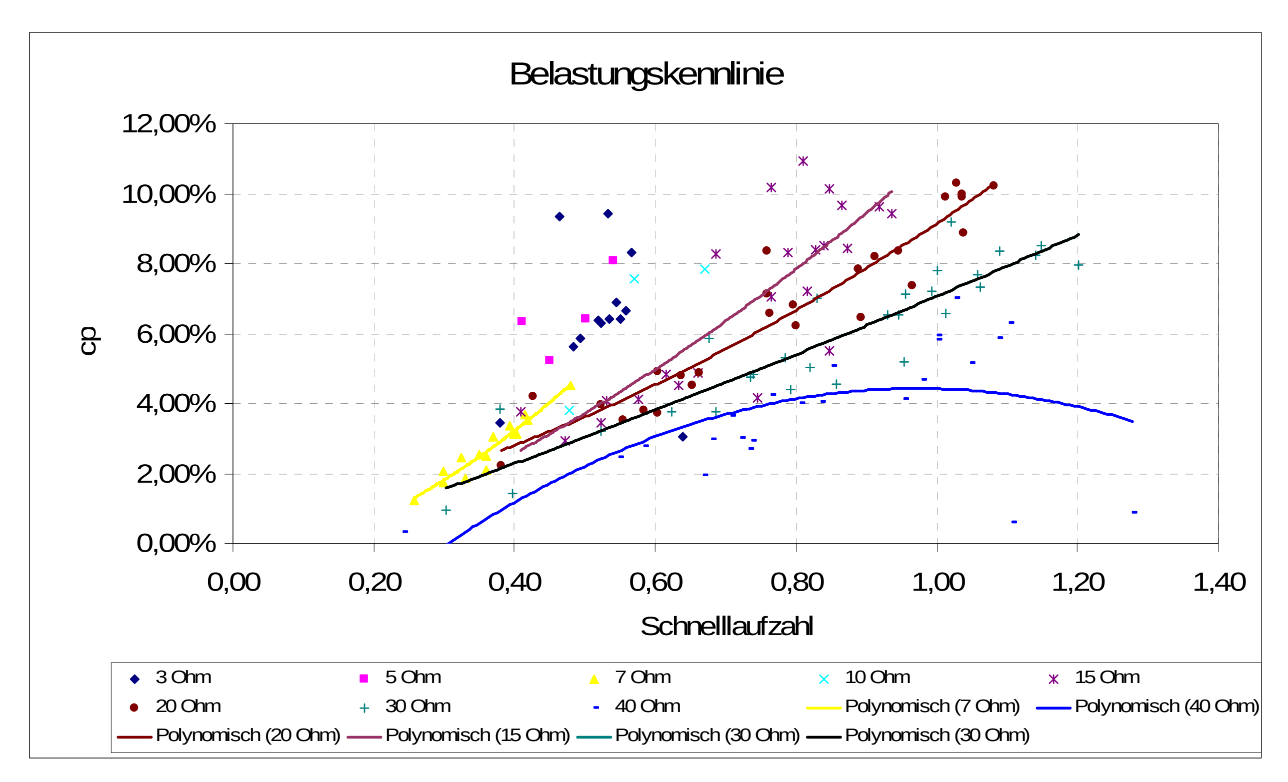


Abb. 65 Belastungsdiagramm

Die Analyse der Messwerte mit dem Leistungspotentiometer brachte einige neue Informationen. Es zeigt sich deutlich, dass die Belastung mit 3, 5 oder 7 Ω zu hoch ist und daher nur einen geringen c_p-Wert erzielt. Mit einer Belastung von 15 und 20 Ω wurden die besten Ergebnisse erzielt, es wurde ein Wirkungsgrad von bis zu 11% erreicht. 40 Ω hingegen waren wieder eine deutlich zu geringe Belastung, und der Wirkungsgrad fiel wieder ab.

6.3. Messung mit MPPT

Nachdem die Kennlinie des Rotors samt Generator aufgezeichnet war, wurde nun der „Savonius Oben Ohne“ auch mit dem Maximum Power Point Tracker getestet, um das Programm an den Rotor anzupassen.

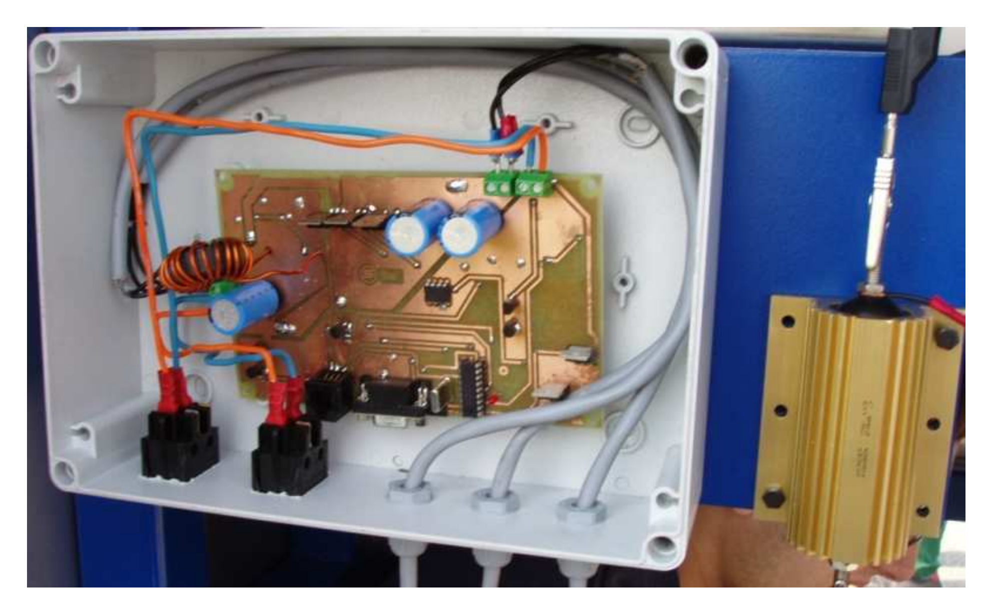


Abb. 66 MPPT im Savonius

Bei diesen Messungen wurde statt der Spannungs- und Strom-Werten am Generator, die Spannung an den Akkumulatoren und der Ladestrom in diese gemessen, um die Leistung des Gesamtaufbaus und dadurch den Gesamtwirkungsgrad zu erhalten.

Die Tabelle sieht diesmal wie folgt aus:

Drehzahl n	**Umfangs-geschwindigkeit**	**Windgeschwindigkeit**	**Schnelllaufzahl**	**Spannung U (Akku)**	**Strom I (Akku)**	**Elektrischer Nettoleistung P**	**Luftstromleistung**	**Elektrischer Wirkungsgrad**

Die komplette Tabelle mit allen Werten befindet sich im Anhang E.

Bei diesen Tests wurde kein regelbarer Widerstand verwendet, sondern der Maximum Power Point Tracker sollte nun seine Aufgabe übernehmen und den Savoniusrotor möglichst optimal belasten. Um die optimale Regelung zu erhalten, wurde zunächst mit demselben Programm wie am Solarpanel getestet. Dieses führte die Regelung sehr schnell aus. Anschließend wurden verschiedene Versionen des Programms getestet. Die Firmwareversionen hatten alle verschieden lange Verzögerungsschleifen, um so die Änderung des PWM-Tastverhältnisses weniger oft pro Sekunde durchzuführen. Dem Savoniusrotor wird so mehr Zeit gegeben, sich an die neue Last anzupassen.

MPPT mit 48 Zugriffen pro Sekunde

Zuerst wurde das Programm vom Solarpanel verwendet, dieses wurde dort erfolgreich getestet und zeigte seine Funktionstüchtigkeit mit einem Wirkungsgrad von rund 80%. Diese Version des Programms (MPPT_v2.0_48) hatte keine besonderen Verzögerungsschleifen und änderte das Tastverhältnis der PWM 48-mal pro Sekunde.

Mit den aufgezeichneten Werten ergab sich folgendes Diagramm (Abbildung 67):

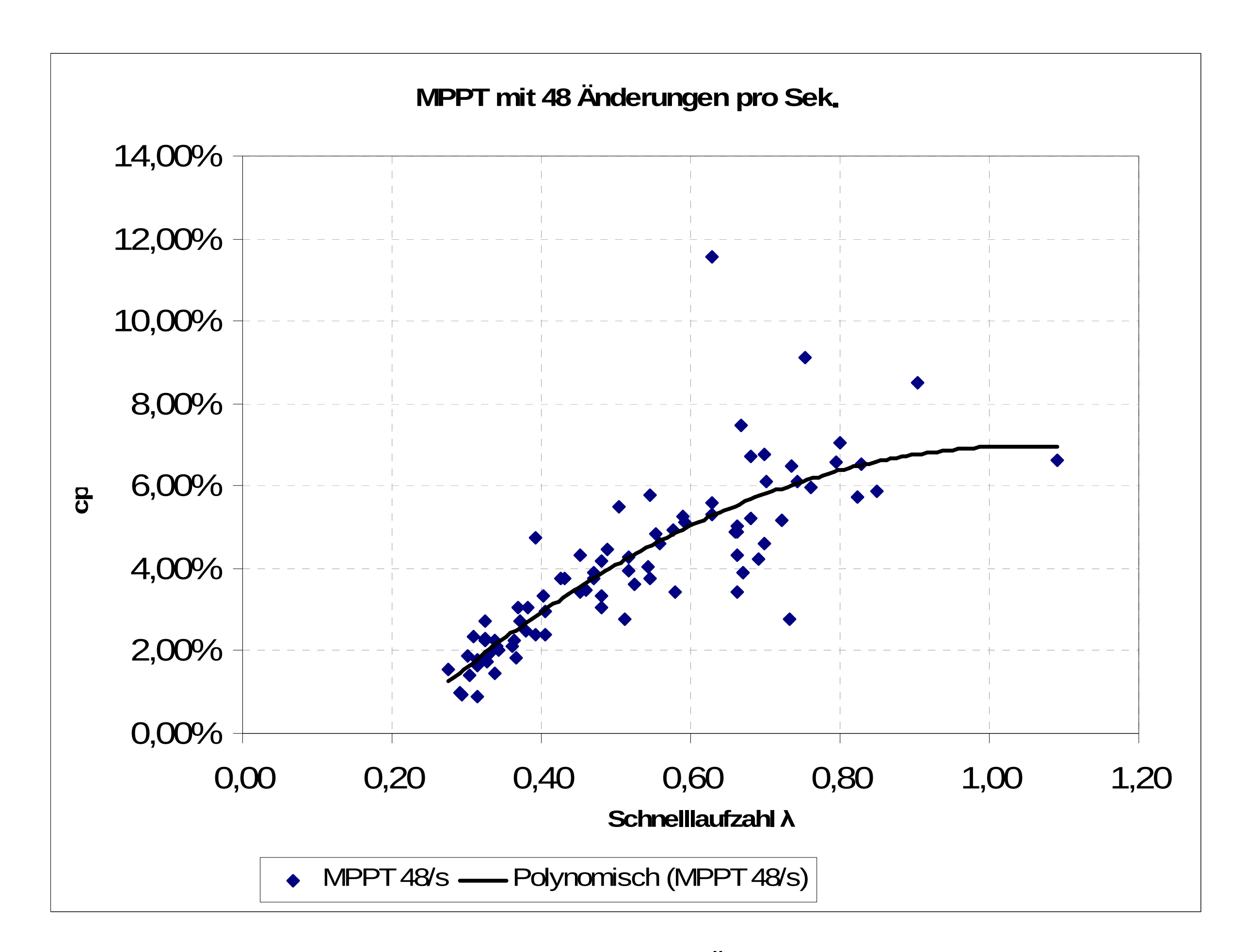


Abb. 67 Kennlinie mit MPPT 48 Änderungen pro Sekunde

Das Diagramm der ersten Tests zeigt, dass der Savoniusrotor zu stark belastet wird. Es wurde herausgefunden, dass das Programm zu schnell regelte. So blieb dem Rotor nicht genug Zeit, sich an die geänderte Last anzupassen. Daher befindet sich die Mehrheit der Messwerte im Bereich von 2 – 4 % Wirkungsgrad. Das nächste Programm sollte nun langsamer sein, um dem Rotor mehr Zeit zu geben, um auf Laständerungen zu reagieren.

MPPT mit 2 Zugriffen pro Sekunde

Mit der Version MPPT_v.2.0_2 sollte das Programm das Tastverhältnis der PMW nur noch 2-mal pro Sekunde ändern.

Mit den aufgenommenen Messwerten entstand folgendes Diagramm (Abbildung 68):

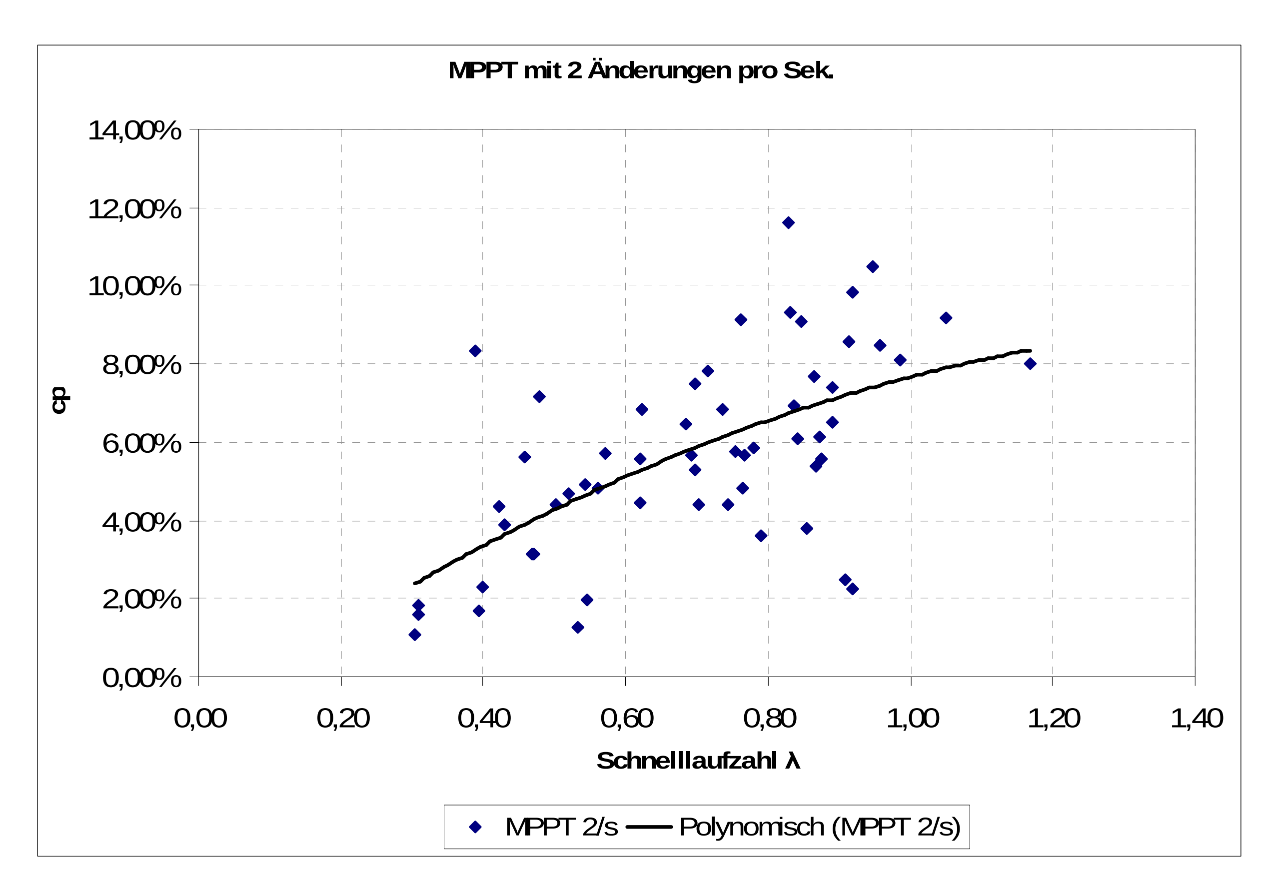


Abb. 68 Kennlinie mit MPPT 2 Änderungen pro Sekunde

Die mit dem Programm MPPT_v.2.0_2 aufgenommenen Messwerte zeigten keine Verbesserung Richtung Maximum Power Point an, sondern nur eine sehr große Streuung der Werte. Es wurde angenommen, dass diese Regelung doch bereits zu langsam für den Wind, der seine Stärke schließlich auch nicht immer kontinuierlich hält, war. Es wurde beschlossen das Programm zu ändern.

MPPT mit 5 Zugriffen pro Sekunde

Die Version MPPT_v2.0_5 greift nur 5-mal pro Sekunde auf die Subroutine zur Änderung des PWM-Tastverhältnisses zu.

Das neue Diagramm in Abbildung 69 sieht wie folgt aus:

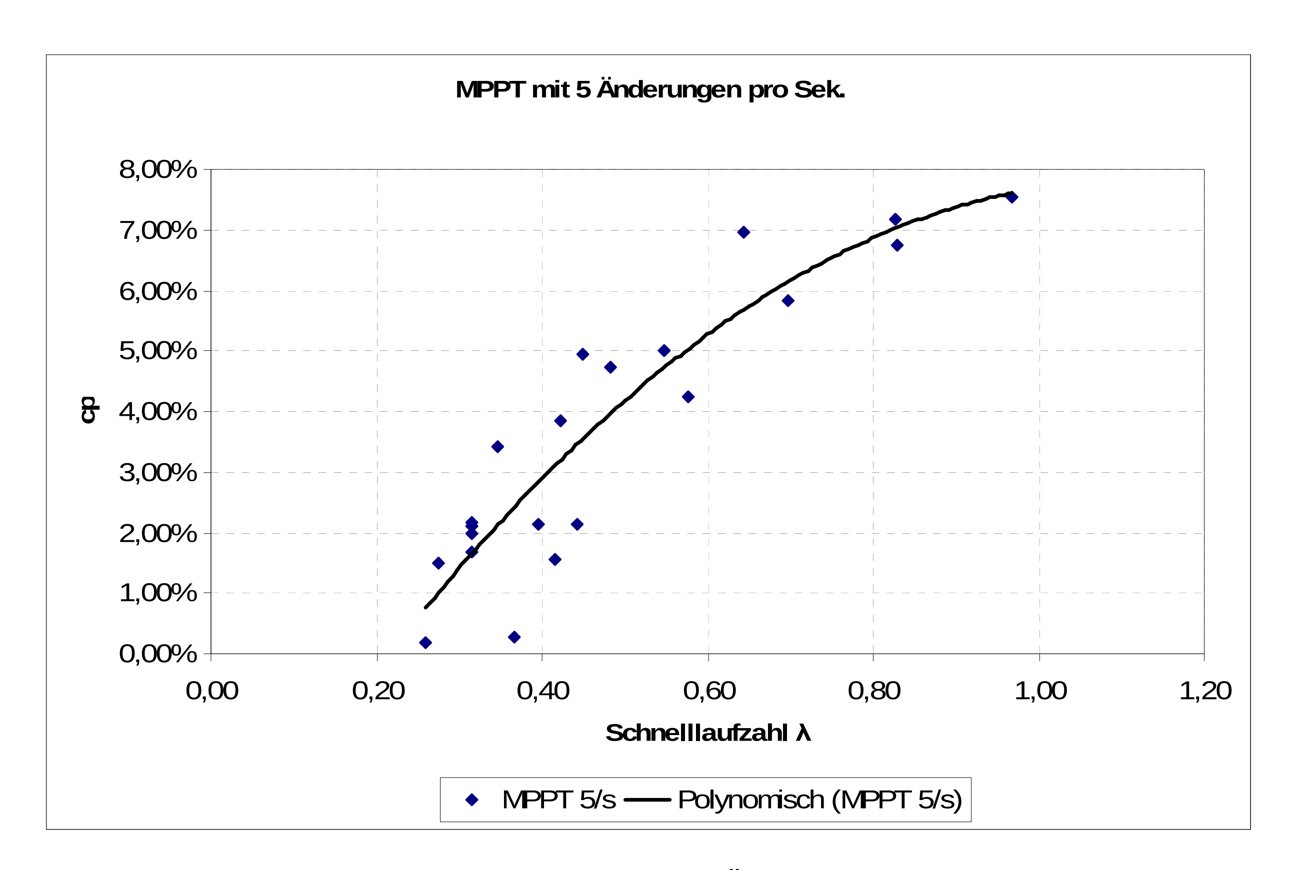


Abb. 69 Kennlinie mit MPPT 5 Änderungen pro Sekunde

Die Messwerte mit dem Programm mit 5 Änderungen pro Sekunde weisen noch immer einen Trend zu 2 bis 4 % Wirkungsgrad auf. Daher wurde beschlossen, das Programm nochmals zu ändern.

MPPT mit 12 Zugriffen pro Sekunde

Mit der neuen Version MPPT_v2.0_12, welche eine Änderung des PWM-Tastverhältnis 12-mal pro Sekunde ausführt, wurde ein Wert zwischen den eindeutig zu schnellen 48 Änderungen pro Sekunde und den vermutlich bereits zu langsamen 5 Änderungen gewählt. Diese Messwerte sahen nun deutlich besser aus und sind in folgendem Diagramm in Abbildung 70 zu sehen:

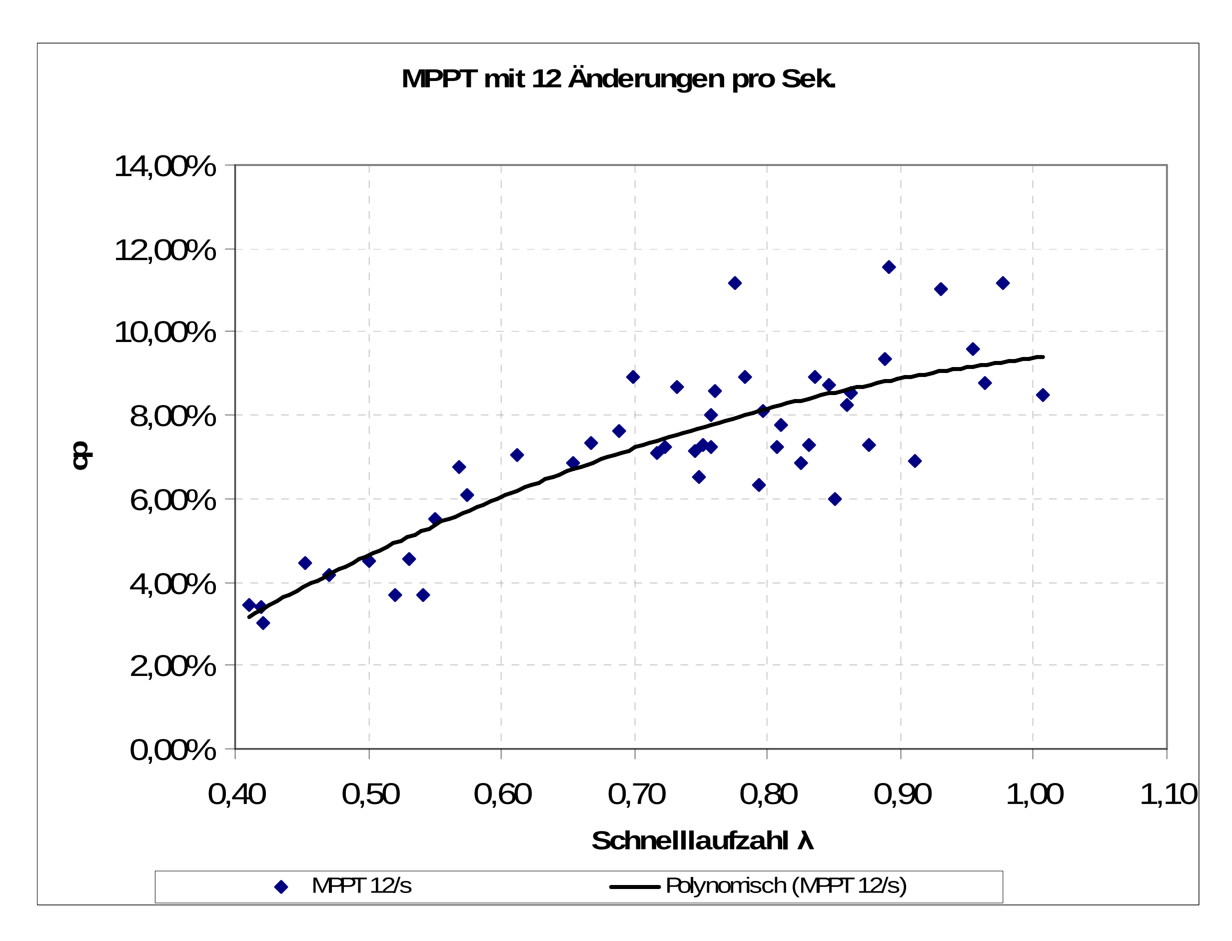


Abb. 70 Kennlinie mit MPPT 12 Änderungen pro Sekunde

Die Messwerte dieses Diagramms zeigen eine deutliche Ballung im oberen Bereich der Kennlinie mit Werten von bis zu 12% Wirkungsgrad auf. Durch die Überlagerung der Messwerte, von den Tests mit dem Leistungspotentiometer, wird die Wirkung des MPPTs deutlich. Der Regler sucht den Maximum Power Point und lässt dem Rotor auch Zeit sich auf seine Laständerungen einzustellen und wandert so zur Spitze der Kennlinie.

Durch eine Überlagerung der Kennlinie, welche mit dem Potentiometer aufgezeichnet wurde, und der MPPT-Kennlinie lässt sich deutlich die Funktion des Maximum Power Point Trackers beweisen (siehe Abbildung 71).

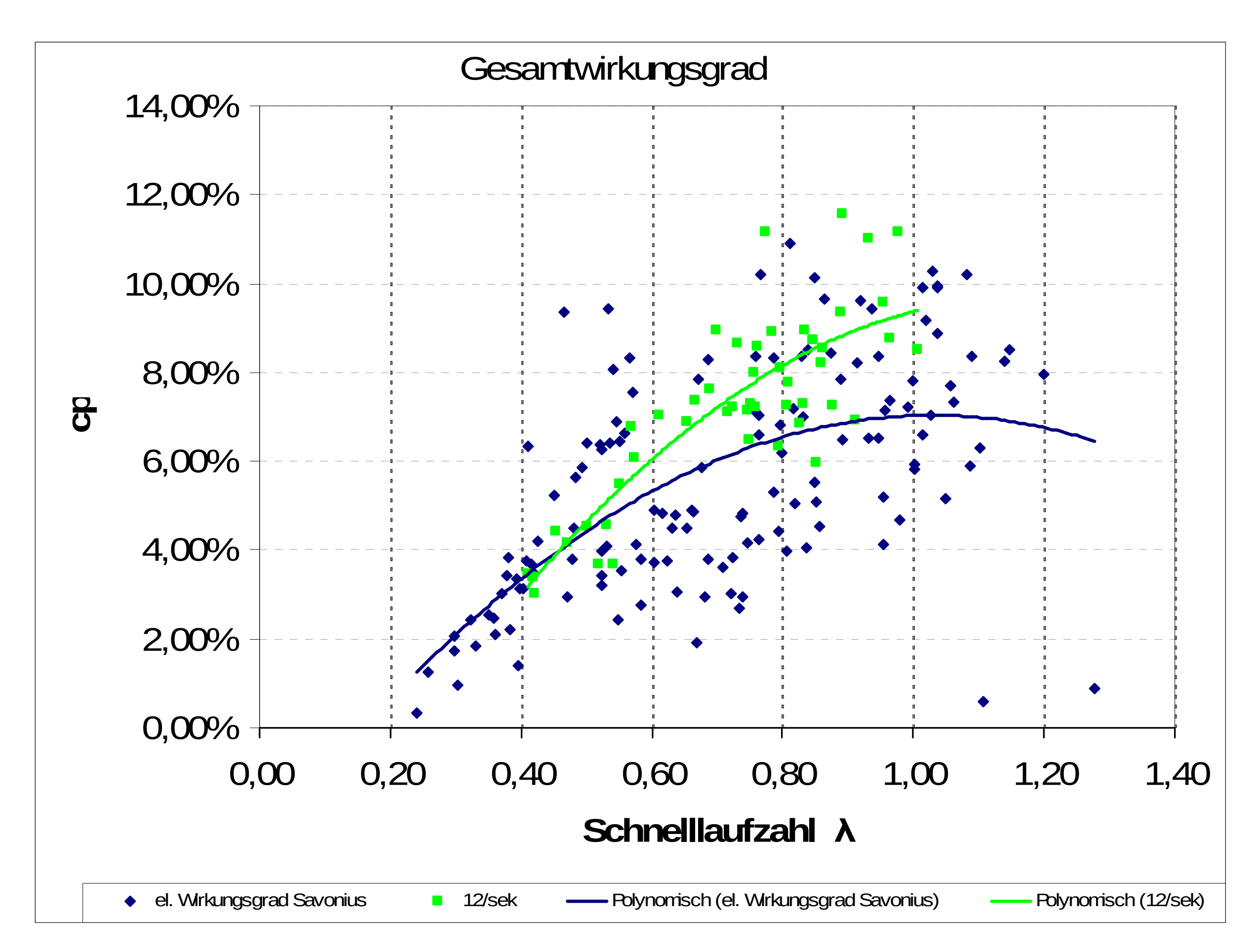


Abb. 71 Überlagerte Kennlinie: MPPT und Potentiometer

Mit dem Widerstand wurden auch viele Werte im unteren Bereich der Kurve aufgenommen, der MPPT lässt dies nicht zu. Er regelt automatisch richtig nach und hält sich so auf der Spitze und arbeitet im Maximum Power Point.

Mit dem MPPT wurden außerdem noch die Werte über die serielle Schnittstelle empfangen und ausgewertet. Dafür wurden entsprechende Excel-Tabellen für die Auswertung der gesendeten Messdaten entwickelt, im Anschluss sind die Funktionen der Datenerfassungstabellen erklärt.

Die Erfassung besteht aus vier Teiltabellen, da die gleichzeitige Verarbeitung von bis zu 65000 Werten sehr unübersichtlich ist und nicht immer auf einmal erledigt werden

kann. Die Messwerte werden als hexadezimaler Code per RS232 gesendet, die Übertragung erfolgte immer in der gleichen Reihenfolge. Die Datenreihe beginnt mit 0xFF als Trennzeichen, danach zuerst Generatorspannung und –strom (beides Eingang), abschließend werden Akkumulatorspannung und –strom (beides Ausgang) übermittelt. Als Beispiel werden Daten von der Übertragung im Anschluss angeführt.

Übertragungsbeispiel vom MPPT zum PC:

```
…         …
FF        Erkennung
48        Eingangsspannung
1A        Eingangsstrom
D1        Ausgangsspannung
0D        Ausgangsstrom
FF        …
42
14
D1
06
FF
…
```

Danach erfolgt die Verarbeitung in den vier Tabellenblättern:

- 01_Werte gefiltert
- 02_HEX Werte auf Spannung und Strom aufteilen (Unterscheidung Ein-/Ausgang)
- 03_HEX in Dezimalzahlen umrechnen
- 04_Messdatenerfassung

01_Werte gefiltert.xls

Ein leeres Tabellenblatt ermöglicht die Ausfilterung der brauchbaren Daten aus dem txt-File vom Hyperterminal. Zuerst müssen mittels Strg+H alle „FF“ durch leere Zellen ersetzt werden, weiters kann man alle „Nicht Leeren“ Felder durch Autofilter auswählen und erneut in einem txt-File speichern.

02_HEX Werte filtern.xls

In der zweiten Tabelle werden die gefilterten Daten aus Tabelle 01 in Eingangsspannung, Eingangsstrom, Ausgangsspannung und –strom unterteilt, die erhaltenen Werte können abschließend wieder mit Hilfe des Autofilters in Tabelle 01 ausgefiltert werden. Dazu müssen alle „Nicht Leeren“ Zellen erneut in einem txt-File gesichert werden.

03_HEX2DEZ.xls

Die Tabelle benötigt das Add-in „Analyse-Funktionen“ in Microsoft Excel vorinstalliert, anschließend werden die gefilterten Daten schrittweise als HEX eingefügt und die automatisch umgerechneten DEZ-Daten können für Tabelle 04 weiter kopiert werden.

04_Messdatenerfassung.xls

Die eigentliche Auswertung der Daten erfolgt erst in Tabelle 04, dazu benötigt man die getrennten, gefilterten Dezimalwerte für Ein- und Ausgang. Die Datei enthält sämtliche Diagramme zu Strömen und Spannungen vom MPPT, weiters wird die Leistung errechnet und ausgegeben. Abschließend gibt es in jeder Graphik die passende Trendlinie („Gleitender Durchschnitt“) und die Tabellen liefern alle umgerechneten Messwerte sowohl graphisch als auch in Zahlenwerten. Die vier Tabellenblätter wurden zur Auswertung der Daten für die folgenden Diagramme verwendet.

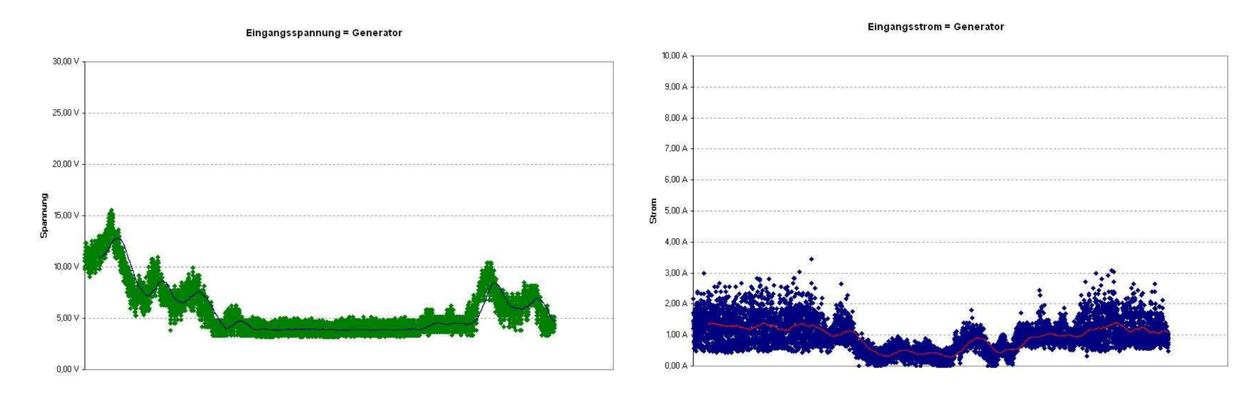


Abb. 72 Eingangswerte am MPPT

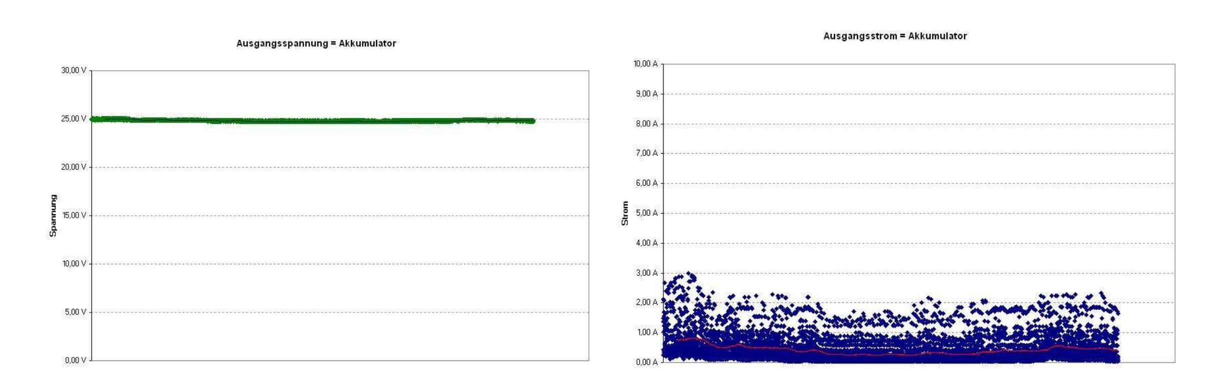


Abb. 73 Ausgangswerte am MPPT

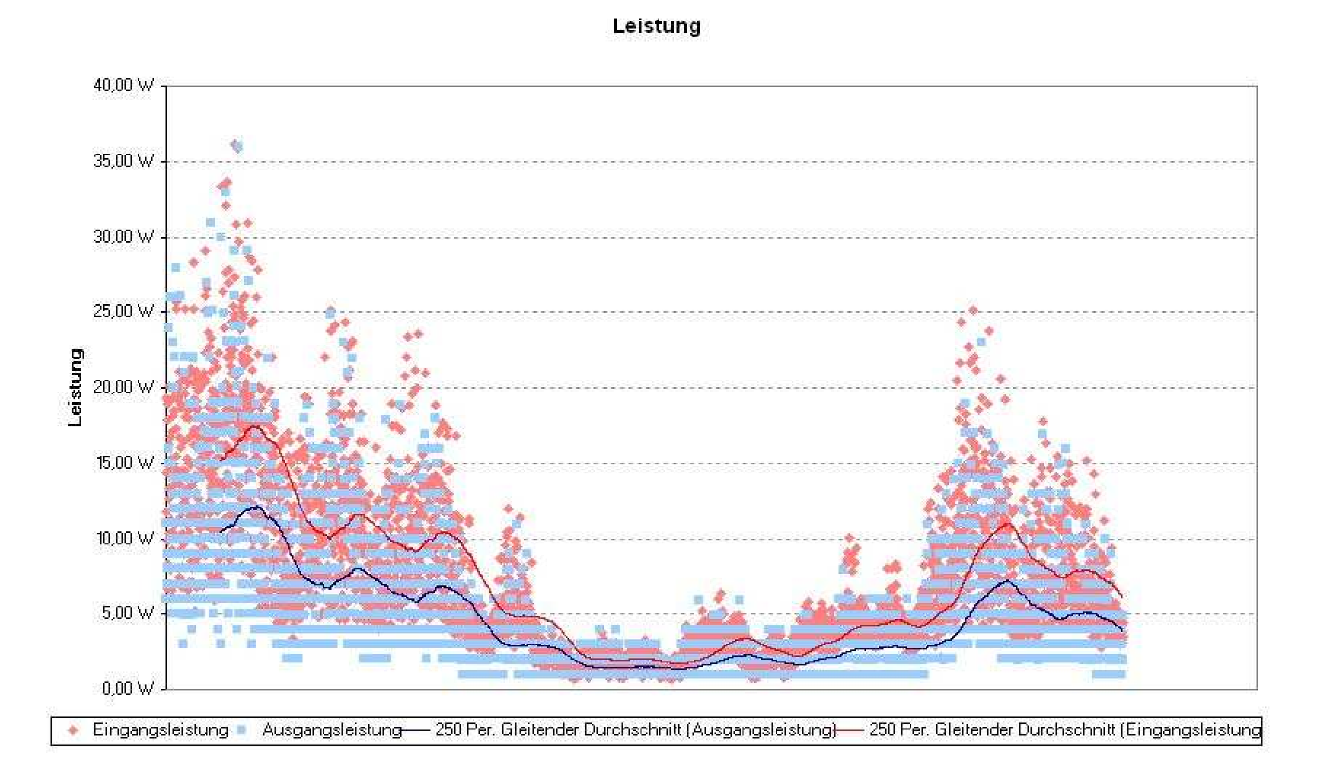


Abb. 74 Leistungswerte an Ein- und Ausgang des MPPT



Abb. 75 Wirkungsgrad des MPPT

7. Erkenntnis

Während der Konstruktion, Berechnung, Fertigung und Testphase des „Savoniusrotors mit Maximum Power Point Tracker“ wurden zahlreiche wichtige Aspekte aufgedeckt. Die Informationen wurden in den ausführlichen Entwurfs- und Testphasen erkannt und bringen weitere Aspekte zum Projektergebnis. Alle erkannten Daten sind für den Betrieb und mögliche Erweiterungen an der Anlage bedeutend.

Modell

Das Modell des Savoniusrotors wurde in Verbindung mit dem selbstgebauten Windkanal zur Ermittlung erster Kenndaten des Rotors verwendet. Wie im Nachhinein erkannt wurde sind viele der gemessenen Leistungswerte wenig brauchbar. Das Hauptproblem ist, dass der erzeugte Wind des Lüfters keine natürlichen Windverhältnisse simuliert. Das heißt, dass auch die Reaktionen des Savoniusrotors nicht komplett realistisch sind. Für die Testphase wäre es durchaus sinnvoll gewesen schon im Freien, vor allem im späteren Einsatzgebiet, mit dem Modell zu testen. Die Werte aus dem Windkanaltest mit der Lüfterschaltung lieferten außerdem nur Werte für den unbelasteten Savoniusrotor, das heißt, die Anlaufwindgeschwindigkeit ist bedeutend niedriger. Ein Test im Freien liefert realistischere Werte. Zur Motordimensionierung kann man für einen Windradprototypen aber am besten die Daten nur am Original messen.

Korrekte Messungen an Windkraftanlagen

Während den Tests am Rotormodell wurden vor allem bei der Messung der Windgeschwindigkeit wichtige Informationen gesammelt. Das Modell diente nicht unbedingt nur zum Kennen lernen des Rotorverhaltens, sondern auch zum Austesten der idealen Messbedingungen. Während der Windmessung darf man nur kurzzeitig den Windkanal unterbrechen, ansonsten bricht die Rotordrehzahl schlagartig ein und benötigt erneut eine längere Anlaufzeit. Um richtige Windmesswerte am Rotor erhalten zu können, muss genügend Abstand vor und nach dem Savonius eingehalten werden. Nahe Messungen verfälschen die Ergebnisse enorm, Verwirbelungen werden durch das Messgerät erzeugt, somit ergibt der Messaufbau schnell verfälschte Daten und Diagramme. Die Verwirbelungen im Rotorbereich sind ebenfalls ein Grund für die teilweise schlechten Messwerte am Modell, da der Abstand zwischen Lüfter, Anemometer und Rotor nicht ideal ist.

Auswahl des Gleichstrommotors

Bei der Auswahl des Gleichstrommotors, für die Verwendung als Generator, ist eine rein theoretische Berechnung nicht ausreichend. Da ein Prototyp des Savoniusrotors geplant und gebaut wurde, konnte die wahre Leistung des Windrads nicht exakt berechnet werden. Sehr wichtig war daher das Austesten der möglichen Leistung mit Hilfe von verschiedenen Lasten. Somit konnten die Leistungskennlinien des Rotors bei verschiedenen Windstärken aufgenommen werden. Die Windmessungen erfolgten am Testaufbau auf einer Teststrecke in Edelstal. Die Kennlinie enthält Spannung und Strom an der Last und die entsprechende Windgeschwindigkeit mit der Rotordrehzahl (siehe Kapitel 6. Messungen). Als Versuchsaufbau wurde im Projekt ein Leistungspotentiometer mit Maximalwiderstand 50 Ω am Generator angeschlossen, während den Windtests konnten so beliebige Belastungen am Motor ausgetestet werden. Alle Daten wurden in Microsoft Excel verarbeitet und dienten als Grundlage für die Feineinstellung des Maximum Power Point Trackers.

Da die Verwendung des Savoniusrotors für Stromerzeugung nicht sehr verbreitet ist, gibt es in der Fachliteratur wenige Anhaltspunkte für die Auswahl eines passenden Generators. Nach Absprache mit dem Motorlieferanten, Firma Spörk, wurde eine zu hohe Übersetzung gewählt. Würde man nochmals einen Generator mit dem jetzigen Wissen kaufen, würde eine niedrigere Übersetzung gewählt werden. Die Firma Minimotor bietet denselben Gleichstrommotor auch mit einem Übersetzungsverhältnis von 17,76 an. Dieser Motor würde sich ausgezeichnet für unsere Zwecke eignen. Hätte man schon anfangs diesen Generator gewählt, könnte man auf den Kettentrieb verzichten. Die Verluste von 40 W im Getriebe wären dadurch kleiner und die Verluste des Kettentriebes würden komplett wegfallen.

Testphase mit professionellem Windkanal

Weiters wichtig für die Erstellung einer noch besseren Kennlinie wären Windkanaltests gewesen. Der Kosten- und Zeitaufwand war allerdings für ein Diplomprojekt im Rahmen der HTL nicht möglich, für die Aufnahme eines vollständigen Diagramms aber notwendig gewesen. Die Windmessungen mit Hilfe des Testaufbaus im Freien lieferten nur nach unzähligen Messungen brauchbare Werte, in einem Windkanal kann man bei gewünschter konstanter Windgeschwindigkeit die Daten einfacher messen. So ist es möglich eine komplette Kennlinie aufzuzeichnen, da auch Spitzenwindgeschwindigkeiten von mehr als 80 km/h über längere Zeit erzeugt werden können.

Dimensionierung der Elektronik

Zur Dimensionierung der Elektronik ist vor allem bei der Größe der Induktivität interessant zu wissen, dass auf jeden Fall die Spule mit einer gewissen Sicherheit exakt dimensioniert werden musste. Sowohl der Drahtquerschnitt der Wicklungen als auch die Größe der Induktivität wurden passend beziehungsweise knapp größer als berechnet ausgeführt. Nach dem alle Leistungsbausteine des Step-Up Converters berechnet und mit ausreichender Sicherheit gewählt wurden, konnten kurze Überlastung und komplette Zerstörung der Elektronik verhindert werden. Die exakte Auswahl der Spule ist beim Aufwärtswandler vor allem bei geringeren Eingangsströmen notwendig, da eine zu kleine Induktivität zum lückenden Betrieb führt. Im lückenden Betrieb kann die Spannung bei geringem Eingangsstrom nicht optimal hochgewandelt werden, der MPPT kann dadurch nicht den bestmöglichen Wirkungsgrad erreichen. Während dem lückenden Betrieb entsteht ein hörbares „Klingelgeräusch“ in der Spule und die Aufwärtswandlung der Spannung verläuft nicht optimal (→ Nähere Informationen finden Sie im Kapitel 5.2 Step-Up Converter).

Anpassung des Maximum Power Point Trackers an den Savoniusrotor

Im Programm für die Steuerung des Maximum Power Point Trackers wurde die Schaltdauer des Leistungs-MOSFET mit Hilfe der PWM vom PIC gesteuert. Dabei wurde erkannt, dass auch eine richtig arbeitende Elektronik bei falscher Einstellung schlechte Ergebnisse liefern kann. Der PIC selbst arbeitet schneller als die Ladedauer der Kondensatoren in der Schaltung, außerdem ist das Verhalten der kompletten Leiterplatte viel dynamischer als das Windrad. Daher musste eine ausreichende Wartedauer für richtige AD-Wandlungen eingeplant werden, da bei der analogen Messung ebenfalls Kondensatoren geladen werden müssen.

Der Savoniusrotor ist auf Grund der Größe und Masse träge, im Gegensatz dazu ist die Elektronik bei einer Taktfrequenz von 10 MHz viel zu schnell. Nach dem die korrekte Funktion des Programmcodes im Labor mit Hilfe von Netzgerät und Solarpanel getestet wurde, lieferte die gleiche Software am echten Rotor nur einen schwachen Wirkungsgrad. Erst durch die ausführliche gemeinsame Testphase der Komponenten „Savoniusrotor“ und „Maximum Power Point Tracker“ konnten die passenden Einstellungen empirisch gefunden werden. Es musste eine Verzögerungsschleife in der Regelung für das pulsweitenmodulierte Ausgangssignal eingebaut werden, damit es der Elektronik gelang den Maximum Power Point zu finden und ihn über längere Zeit zu halten. Die Ermittlung der idealen Einstellung wurde genauer im Kapitel 6.3 Messung mit MPPT ab Seite 110 beschrieben.

8. Verzeichnisse

8.1. Quellenverzeichnis

[GROT1978] Henry Grotmaack, Messung der technischen Daten von Vertikalachsen-Windrotoren, März 1978

[HAUE2003] Erich Hau, Windkraftanlagen – Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit 3.Auflage, 2003

[RMME2001] Roloff, /Matek Maschinenelemente – Normung, Berechnung, Gestaltung, 15. Auflage, 2001

[RMTB2001] Roloff/Matek, Maschinenelemente Tabellen, 15. Auflage, 2001

[SCHA1987] Winfried Schatter, Windkonverter: Bauarten, Wirkungsgrade, Auslegung; 1987

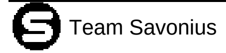
[SCHM2003] Heinz Schmidt-Walter, Grundlegendes zu Schaltnetzteile. 2003 http://www.user.fh-stralsund.de/~emasch/1024x768/Dokumentenframe/Kompendium/Schaltnetzteile/Frame_Schaltnetzteile.htm

[SCHU2005] Heinz Schulz, Der Savonius-Rotor. 8. Auflage 2005

[SPRU2000] Jörg Bredendiek, Schaltregler-Grundlagen, 2003 http://www.sprut.de/electronic/switch/schalt.html

[WIKI2006] Wikipedia, die freie Enzyklopädie. 2006 http://de.wikipedia.org/wiki/Solarpanel

8.2. Abbildungsverzeichnis



8.3. Tabellenverzeichnis

ANHANG

Anhang A:

Genehmigung der Diplomarbeit

Seite 1

Seite2

Anhang B:

Terminplan

Geplant 1

Geplant 2

Wirklich1

Wirklich2

Projektarbeiter	**Zeitaufwand**
Grohs Daniel	200 h
Kimpfinger Koloman (PL)	200 h
Lerch Harald	200 h
Redl Patrick	200 h

Bei der Ausarbeitung der Dokumentation arbeiteten alle

Anhang C:

Projektkosten

Kostenquelle	**Kaufpreis**	**Kosten**
Bauteile	60 €	0 €
Platine	12 €	0 €
Bremswiderstand	24 €	0 €
Gehäuse und Kabel	20 €	0 €
Lüfterbauteile	15 €	0 €
Anschlussklemmen	5 €	5 €
2 x Akkumulatoren	100 €	0 €
2 x Sterngriffe	4,20 €	0 €
Fußspindel + Einsatz	27,60 €	0 €
Griff	3,20 €	0 €
Lagerung	77,4 €	0 €
Gestell	100 €	0 €
Motor	337,5 €	0 €
Kettenräder	85 €	0 €
Lackieren	75 €	0 €
Plexiglas	62,50 €	0 €
Rotor	150 €	0 €
Verkleidung	200 €	0 €
Welle	100 €	0 €
Modell	20 €	0 €
Summe	**1478,4**	**5 €**

Anhang D:

Bedienungsanleitung

Inbetriebnahme des Savoniusrotors mit Maximum Power Point Tracker

Der gesamte Savoniusrotor ist sehr einfach in drei Teile teilbar: die Achse, das Gestell und die Rotorblätter.

Um die Welle mit dem Rotor zu verbinden wird die Welle plan bis zum oberen Stellring in den Rotor geschoben. Nach dem Anziehen der Wurmschrauben kann die Welle in das Lager des gekippten Gestells gesteckt werden. Hier werden nur beim oberen Lager die Wurmschrauben angezogen, da das untere Lager als einwertiges Lager ausgeführt ist.

Das Gestell muss nach dem Aufrichten vor der Inbetriebnahme nieder gespannt werden. Dazu sind Stahlseile mit Seilspannern an den vier Ecken vorgesehen. Die Hacken an den Seilenden werden in die im Boden verankerten Heringe gehängt und das Seil mit den Seilspannern gespannt.



Abb. 76 Niederspannvorrichtung

Bevor die Elektronik angeschlossen wird, müssen die Schalter in Aus-Position sein. Der durch den Rotor betriebene Generator wird unter Berücksichtigung der elektrischen Polung an den Eingang des Maximum Power Point Trackers geschlossen. Die zu ladenden 12 Volt Akkumulatoren werden in die dafür vorgesehene Wanne gestellt. Sie müssen in Serie (Jeweils ein Pluspol des einen Akkus wird mit einem Minuspol des anderen Akkus verbunden) ebenfalls unter Berücksichtigung der Polung mit der Schaltung verbunden werden.



Abb. 77 Gehäuse - Ladeschaltung

Zuerst wird der Schalter „1. Accumulator“ betätigt, um die Schaltung mit Strom zu versorgen. Anschließend wird auch der Schalter „2. Generator“ betätigt, um diesen an den Eingang des MPPT zu schalten.

Der Aufbau ist nun betriebsbereit und nutzt die Windenergie optimal zum Laden der Akkumulatoren aus.

Akkuwechsel:

Nachdem die Akkumulatoren vollständig geladen sind, müssen diese ausgewechselt werden. Solange dies nicht geschieht wird die durch den Rotor erzeugte Energie nicht genutzt und sinnlos am Bremswiderstand in Wärme umgewandelt. Bevor die Akkus von der Ladestation getrennt werden dürfen, muss auch der Generator abgetrennt werden. Dazu betätigt man zuerst den Schalter „2. Generator“ damit wird dieser weggeschaltet, und es liegt keine Spannung am Eingang der Ladeschaltung. Anschließend wird der Schalter „1. Accumulator“ auf Aus geschalten. Nun können die Batterien gefahrlos gewechselt werden.

Beim wieder anschließen, muss wieder darauf geachtet werden, dass die Akkumulatoren richtig verbunden werden. Anschließend wird wieder zuerst die Schaltung mit Strom versorgt in dem der Schalter „1. Accumulator“ auf Ein geschalten wird. Abschließend kann auch der Generator wieder zu geschaltet werden. Damit läuft der Aufbau wieder und lädt die neuen Akkus.

Anhang E:

Messdaten

Messdaten zur Belastungskennlinie

Lastwider-stand	Rotordrehzahl	Rotorum-fangsgeschw.	Windge-schwin-digkeiten	Schnell-laufzahl	Spannung	Strom	el. Netto-leistung	Leistung Luftstrom durch Rotor-querschnitt	el. Wirkungsgrad Savonius
3 Ω	111 1/min	3,49 m/s	7,5 m/s	0,46	5,9 V	2,90 A	17,11 W	183,01 W	9,35%
	138 1/min	4,34 m/s	8,8 m/s	0,49	7,3 V	2,37 A	17,30 W	295,62 W	5,85%
	128 1/min	4,02 m/s	8,3 m/s	0,48	6,7 V	2,08 A	13,94 W	248,04 W	5,62%
	168 1/min	5,28 m/s	9,6 m/s	0,55	8,6 V	2,87 A	24,68 W	383,80 W	6,43%
	144 1/min	4,52 m/s	8,7 m/s	0,52	7,6 V	2,39 A	18,16 W	285,66 W	6,36%
	170 1/min	5,34 m/s	10,2 m/s	0,52	9,8 V	2,95 A	28,91 W	460,35 W	6,28%
	94 1/min	2,95 m/s	7,8 m/s	0,38	4,9 V	1,44 A	7,06 W	205,86 W	3,43%
	160 1/min	5,03 m/s	9,4 m/s	0,53	8,9 V	2,60 A	23,14 W	360,31 W	6,42%
	167 1/min	5,25 m/s	9,4 m/s	0,56	9,7 V	2,47 A	23,96 W	360,31 W	6,65%
	151 1/min	4,74 m/s	8,7 m/s	0,55	9,0 V	2,19 A	19,71 W	285,66 W	6,90%
	144 1/min	4,52 m/s	8,0 m/s	0,57	8,4 V	2,20 A	18,48 W	222,11 W	8,32%
	112 1/min	3,52 m/s	6,6 m/s	0,53	7,4 V	1,59 A	11,77 W	124,72 W	9,43%
	118 1/min	3,71 m/s	5,8 m/s	0,64	2,0 V	1,29 A	2,58 W	84,64 W	3,05%
5 Ω	64 1/min	2,01 m/s	4,9 m/s	0,41	3,6 V	0,90 A	3,24 W	51,04 W	6,35%
	142 1/min	4,46 m/s	8,9 m/s	0,50	8,9 V	2,20 A	19,58 W	305,82 W	6,40%
	152 1/min	4,78 m/s	10,6 m/s	0,45	10,0 V	2,70 A	27,00 W	516,66 W	5,23%
	160 1/min	5,03 m/s	9,3 m/s	0,54	10,5 V	2,68 A	28,14 W	348,93 W	8,06%
7 Ω	90 1/min	2,83 m/s	7,0 m/s	0,40	5,6 V	0,83 A	4,65 W	148,79 W	3,12%
	80 1/min	2,51 m/s	6,8 m/s	0,37	5,3 V	0,78 A	4,13 W	136,40 W	3,03%
	65 1/min	2,04 m/s	6,3 m/s	0,32	4,2 V	0,63 A	2,65 W	108,47 W	2,44%
	80 1/min	2,51 m/s	6,4 m/s	0,39	5,1 V	0,75 A	3,83 W	113,72 W	3,36%
	95 1/min	2,98 m/s	8,3 m/s	0,36	6,0 V	0,87 A	5,22 W	248,04 W	2,10%
	45 1/min	1,41 m/s	5,5 m/s	0,26	2,5 V	0,36 A	0,90 W	72,17 W	1,25%
	80 1/min	2,51 m/s	7,0 m/s	0,36	5,0 V	0,74 A	3,70 W	148,79 W	2,49%
	78 1/min	2,45 m/s	7,0 m/s	0,35	5,0 V	0,76 A	3,80 W	148,79 W	2,55%
	60 1/min	1,88 m/s	6,3 m/s	0,30	3,6 V	0,52 A	1,87 W	108,47 W	1,73%
	65 1/min	2,04 m/s	6,2 m/s	0,33	3,6 V	0,53 A	1,91 W	103,39 W	1,85%
	90 1/min	2,83 m/s	7,1 m/s	0,40	5,7 V	0,85 A	4,85 W	155,26 W	3,12%
	60 1/min	1,88 m/s	6,3 m/s	0,30	3,9 V	0,57 A	2,22 W	108,47 W	2,05%
	130 1/min	4,08 m/s	8,5 m/s	0,48	9,1 V	1,32 A	12,01 W	266,41 W	4,51%
	90 1/min	2,83 m/s	6,8 m/s	0,42	5,9 V	0,85 A	5,02 W	136,40 W	3,68%
	80 1/min	2,51 m/s	6,0 m/s	0,42	4,7 V	0,70 A	3,29 W	93,70 W	3,51%
10 Ω	120 1/min	3,77 m/s	7,9 m/s	0,48	9,0 V	0,90 A	8,10 W	213,88 W	3,79%
	140 1/min	4,40 m/s	7,7 m/s	0,57	11,5 V	1,30 A	14,95 W	198,04 W	7,55%
	220 1/min	6,91 m/s	10,3 m/s	0,67	18,2 V	2,04 A	37,13 W	474,02 W	7,83%
15 Ω	82 1/min	2,58 m/s	6,3 m/s	0,41	6,0 V	0,68 A	4,08 W	108,47 W	3,76%
	300 1/min	9,42 m/s	10,9 m/s	0,86	22,6 V	2,40 A	54,24 W	561,78 W	9,65%
	270 1/min	8,48 m/s	10,0 m/s	0,85	20,0 V	2,20 A	44,00 W	433,80 W	10,14%
	240 1/min	7,54 m/s	9,3 m/s	0,81	18,5 V	2,06 A	38,11 W	348,93 W	10,92%
	190 1/min	5,97 m/s	7,8 m/s	0,77	13,8 V	1,52 A	20,98 W	205,86 W	10,19%
	240 1/min	7,54 m/s	11,0 m/s	0,69	20,8 V	2,30 A	47,84 W	577,39 W	8,29%
	270 1/min	8,48 m/s	10,0 m/s	0,85	19,0 V	1,26 A	23,94 W	433,80 W	5,52%

	209 1/min	6,57 m/s	8,8 m/s	0,75	10,7 V	1,15 A	12,31 W	295,62 W	4,16%
	272 1/min	8,55 m/s	9,3 m/s	0,92	23,0 V	1,46 A	33,58 W	348,93 W	9,62%
	253 1/min	7,95 m/s	9,1 m/s	0,87	20,6 V	1,34 A	27,60 W	326,90 W	8,44%
	230 1/min	7,23 m/s	8,6 m/s	0,84	18,8 V	1,25 A	23,50 W	275,92 W	8,52%
	214 1/min	6,72 m/s	8,8 m/s	0,76	17,8 V	1,17 A	20,83 W	295,62 W	7,04%
	224 1/min	7,04 m/s	8,5 m/s	0,83	18,3 V	1,22 A	22,33 W	266,41 W	8,38%
	277 1/min	8,70 m/s	9,3 m/s	0,94	22,5 V	1,46 A	32,85 W	348,93 W	9,41%
	105 1/min	3,30 m/s	7,0 m/s	0,47	8,1 V	0,54 A	4,37 W	148,79 W	2,94%
	125 1/min	3,93 m/s	7,5 m/s	0,52	9,8 V	0,64 A	6,27 W	183,01 W	3,43%
	115 1/min	3,61 m/s	6,8 m/s	0,53	9,3 V	0,60 A	5,58 W	136,40 W	4,09%
	161 1/min	5,06 m/s	8,0 m/s	0,63	12,5 V	0,80 A	10,00 W	222,11 W	4,50%
	143 1/min	4,49 m/s	7,8 m/s	0,58	11,2 V	0,76 A	8,51 W	205,86 W	4,13%
	185 1/min	5,81 m/s	8,8 m/s	0,66	14,9 V	0,97 A	14,45 W	295,62 W	4,89%
	178 1/min	5,59 m/s	7,1 m/s	0,79	14,2 V	0,91 A	12,92 W	155,26 W	8,32%
	153 1/min	4,81 m/s	7,8 m/s	0,62	12,3 V	0,81 A	9,96 W	205,86 W	4,84%
	213 1/min	6,69 m/s	8,2 m/s	0,82	16,4 V	1,05 A	17,22 W	239,18 W	7,20%
20 Ω	90 1/min	2,83 m/s	7,4 m/s	0,38	8,6 V	0,45 A	3,87 W	175,79 W	2,20%
	110 1/min	3,46 m/s	6,6 m/s	0,52	9,0 V	0,55 A	4,95 W	124,72 W	3,97%
	150 1/min	4,71 m/s	7,8 m/s	0,60	13,8 V	0,73 A	10,07 W	205,86 W	4,89%
	150 1/min	4,71 m/s	7,4 m/s	0,64	13,0 V	0,65 A	8,45 W	175,79 W	4,81%
	80 1/min	2,51 m/s	5,9 m/s	0,43	8,3 V	0,45 A	3,74 W	89,09 W	4,19%
	310 1/min	9,74 m/s	10,3 m/s	0,95	27,5 V	1,44 A	39,60 W	474,02 W	8,35%
	370 1/min	11,62 m/s	11,2 m/s	1,04	31,1 V	1,74 A	54,11 W	609,46 W	8,88%
	320 1/min	10,05 m/s	9,3 m/s	1,08	26,4 V	1,35 A	35,64 W	348,93 W	10,21%
	252 1/min	7,92 m/s	8,9 m/s	0,89	21,8 V	1,10 A	23,98 W	305,82 W	7,84%
	275 1/min	8,64 m/s	8,4 m/s	1,03	23,0 V	1,15 A	26,45 W	257,11 W	10,29%
	247 1/min	7,76 m/s	8,5 m/s	0,91	20,8 V	1,05 A	21,84 W	266,41 W	8,20%
	284 1/min	8,92 m/s	10,0 m/s	0,89	23,6 V	1,19 A	28,08 W	433,80 W	6,47%
	297 1/min	9,33 m/s	9,0 m/s	1,04	25,0 V	1,26 A	31,50 W	316,24 W	9,96%
	300 1/min	9,42 m/s	9,3 m/s	1,01	26,2 V	1,32 A	34,58 W	348,93 W	9,91%
	300 1/min	9,42 m/s	9,1 m/s	1,04	25,3 V	1,28 A	32,38 W	326,90 W	9,91%
	224 1/min	7,04 m/s	8,8 m/s	0,80	19,1 V	0,96 A	18,34 W	295,62 W	6,20%
	134 1/min	4,21 m/s	7,2 m/s	0,58	10,8 V	0,57 A	6,16 W	161,91 W	3,80%
	160 1/min	5,03 m/s	7,7 m/s	0,65	13,3 V	0,67 A	8,91 W	198,04 W	4,50%
	170 1/min	5,34 m/s	7,0 m/s	0,76	14,0 V	0,70 A	9,80 W	148,79 W	6,59%
	128 1/min	4,02 m/s	5,3 m/s	0,76	10,4 V	0,52 A	5,41 W	64,58 W	8,37%
	111 1/min	3,49 m/s	6,3 m/s	0,55	9,1 V	0,42 A	3,82 W	108,47 W	3,52%
	150 1/min	4,71 m/s	7,8 m/s	0,60	12,1 V	0,63 A	7,62 W	205,86 W	3,70%
	145 1/min	4,56 m/s	6,0 m/s	0,76	11,5 V	0,58 A	6,67 W	93,70 W	7,12%
	154 1/min	4,84 m/s	7,3 m/s	0,66	12,6 V	0,65 A	8,19 W	168,76 W	4,85%
	190 1/min	5,97 m/s	7,5 m/s	0,80	15,6 V	0,80 A	12,48 W	183,01 W	6,82%
	215 1/min	6,75 m/s	7,0 m/s	0,96	12,9 V	0,85 A	10,97 W	148,79 W	7,37%
30 Ω	470 1/min	14,77 m/s	12,3 m/s	1,20	42,9 V	1,50 A	64,35 W	807,24 W	7,97%
	350 1/min	11,00 m/s	11,5 m/s	0,96	30,0 V	1,57 A	47,10 W	659,76 W	7,14%
	140 1/min	4,40 m/s	6,5 m/s	0,68	14,0 V	0,50 A	7,00 W	119,13 W	5,88%
	148 1/min	4,65 m/s	5,6 m/s	0,83	12,7 V	0,42 A	5,33 W	76,18 W	7,00%
	80 1/min	2,51 m/s	4,8 m/s	0,52	7,0 V	0,22 A	1,54 W	47,97 W	3,21%
	52 1/min	1,63 m/s	4,3 m/s	0,38	6,6 V	0,20 A	1,32 W	34,49 W	3,83%
	280 1/min	8,80 m/s	9,3 m/s	0,95	25,3 V	0,90 A	22,77 W	348,93 W	6,53%
	250 1/min	7,85 m/s	7,7 m/s	1,02	23,3 V	0,78 A	18,17 W	198,04 W	9,18%
	340 1/min	10,68 m/s	11,2 m/s	0,95	30,5 V	1,04 A	31,72 W	609,46 W	5,20%

	380 1/min	11,94 m/s	10,4 m/s	1,15	34,6 V	1,20 A	41,52 W	487,97 W	8,51%
	360 1/min	11,31 m/s	11,4 m/s	0,99	36,8 V	1,26 A	46,37 W	642,69 W	7,21%
	207 1/min	6,50 m/s	8,2 m/s	0,79	17,6 V	0,60 A	10,56 W	239,18 W	4,42%
	242 1/min	7,60 m/s	7,6 m/s	1,00	21,2 V	0,70 A	14,84 W	190,43 W	7,79%
	240 1/min	7,54 m/s	8,1 m/s	0,93	21,2 V	0,71 A	15,05 W	230,54 W	6,53%
	311 1/min	9,77 m/s	9,2 m/s	1,06	27,2 V	0,91 A	24,75 W	337,79 W	7,33%
	288 1/min	9,05 m/s	8,3 m/s	1,09	25,0 V	0,83 A	20,75 W	248,04 W	8,37%
	341 1/min	10,71 m/s	9,4 m/s	1,14	30,0 V	0,99 A	29,70 W	360,31 W	8,24%
	286 1/min	8,98 m/s	8,5 m/s	1,06	25,0 V	0,82 A	20,50 W	266,41 W	7,69%
	300 1/min	9,42 m/s	9,3 m/s	1,01	26,4 V	0,87 A	22,97 W	348,93 W	6,58%
	58 1/min	1,82 m/s	6,0 m/s	0,30	4,9 V	0,18 A	0,88 W	93,70 W	0,94%
	82 1/min	2,58 m/s	6,5 m/s	0,40	7,0 V	0,24 A	1,68 W	119,13 W	1,41%
	125 1/min	3,93 m/s	6,3 m/s	0,62	11,0 V	0,37 A	4,07 W	108,47 W	3,75%
	210 1/min	6,60 m/s	7,7 m/s	0,86	18,0 V	0,50 A	9,00 W	198,04 W	4,54%
	175 1/min	5,50 m/s	7,0 m/s	0,79	15,5 V	0,51 A	7,91 W	148,79 W	5,31%
	164 1/min	5,15 m/s	7,0 m/s	0,74	14,7 V	0,48 A	7,06 W	148,79 W	4,74%
	153 1/min	4,81 m/s	6,5 m/s	0,74	13,1 V	0,44 A	5,76 W	119,13 W	4,84%
	164 1/min	5,15 m/s	7,5 m/s	0,69	14,4 V	0,48 A	6,91 W	183,01 W	3,78%
	201 1/min	6,31 m/s	7,7 m/s	0,82	17,5 V	0,57 A	9,98 W	198,04 W	5,04%
40 Ω	130 1/min	4,08 m/s	7,0 m/s	0,58	12,5 V	0,33 A	4,13 W	148,79 W	2,77%
	210 1/min	6,60 m/s	9,0 m/s	0,73	18,5 V	0,46 A	8,51 W	316,24 W	2,69%
	170 1/min	5,34 m/s	8,0 m/s	0,67	13,4 V	0,32 A	4,29 W	222,11 W	1,93%
	110 1/min	3,46 m/s	6,3 m/s	0,55	9,8 V	0,27 A	2,65 W	108,47 W	2,44%
	370 1/min	11,62 m/s	9,1 m/s	1,28	3,3 V	0,88 A	2,90 W	326,90 W	0,89%
	370 1/min	11,62 m/s	10,5 m/s	1,11	3,5 V	0,85 A	2,98 W	502,18 W	0,59%
	322 1/min	10,12 m/s	10,6 m/s	0,95	28,5 V	0,75 A	21,38 W	516,66 W	4,14%
	322 1/min	10,12 m/s	9,3 m/s	1,09	28,5 V	0,72 A	20,52 W	348,93 W	5,88%
	271 1/min	8,51 m/s	8,5 m/s	1,00	24,6 V	0,63 A	15,50 W	266,41 W	5,82%
	312 1/min	9,80 m/s	10,0 m/s	0,98	28,6 V	0,71 A	20,31 W	433,80 W	4,68%
	327 1/min	10,27 m/s	9,8 m/s	1,05	28,8 V	0,73 A	21,02 W	408,29 W	5,15%
	316 1/min	9,93 m/s	9,0 m/s	1,10	28,1 V	0,71 A	19,95 W	316,24 W	6,31%
	255 1/min	8,01 m/s	7,8 m/s	1,03	24,1 V	0,60 A	14,46 W	205,86 W	7,02%
	258 1/min	8,11 m/s	8,1 m/s	1,00	23,2 V	0,59 A	13,69 W	230,54 W	5,94%
	50 1/min	1,57 m/s	6,5 m/s	0,24	4,0 V	0,10 A	0,40 W	119,13 W	0,34%
	195 1/min	6,13 m/s	8,3 m/s	0,74	16,9 V	0,43 A	7,27 W	248,04 W	2,93%
	205 1/min	6,44 m/s	7,7 m/s	0,84	17,8 V	0,45 A	8,01 W	198,04 W	4,04%
	190 1/min	5,97 m/s	7,4 m/s	0,81	16,7 V	0,42 A	7,01 W	175,79 W	3,99%
	156 1/min	4,90 m/s	7,2 m/s	0,68	13,7 V	0,35 A	4,80 W	161,91 W	2,96%
	177 1/min	5,56 m/s	7,7 m/s	0,72	15,3 V	0,39 A	5,97 W	198,04 W	3,01%
	176 1/min	5,53 m/s	6,5 m/s	0,85	15,5 V	0,39 A	6,05 W	119,13 W	5,07%
	142 1/min	4,46 m/s	6,3 m/s	0,71	12,3 V	0,32 A	3,94 W	108,47 W	3,63%
	152 1/min	4,78 m/s	6,6 m/s	0,72	13,6 V	0,35 A	4,76 W	124,72 W	3,82%
	185 1/min	5,81 m/s	7,6 m/s	0,76	16,4 V	0,49 A	8,04 W	190,43 W	4,22%

MPPT mit 48 Änderungen pro Sekunde

Rotordrehzahl	Rotorum-fangsgeschw.	Windge-schwin-digkeiten	Schnell-laufzahl	Strom am Akku	Spannung am Akku	el. Leistung MPPT	Leistung Luftstrom durch Rotor-querschnitt	el. Wirkungsgrad Savonius mit MPPT
90 1/min	2,83 m/s	7,4 m/s	0,38	0,22 A	24,5 V	5,39 W	175,79 W	3,07%
110 1/min	3,46 m/s	8,0 m/s	0,43	0,34 A	24,6 V	8,36 W	222,11 W	3,77%
115 1/min	3,61 m/s	7,5 m/s	0,48	0,25 A	24,5 V	6,13 W	183,01 W	3,35%
80 1/min	2,51 m/s	6,8 m/s	0,37	0,17 A	24,5 V	4,17 W	136,40 W	3,05%
70 1/min	2,20 m/s	7,1 m/s	0,31	0,15 A	24,5 V	3,68 W	155,26 W	2,37%
90 1/min	2,83 m/s	7,0 m/s	0,40	0,18 A	24,5 V	4,41 W	148,79 W	2,96%
70 1/min	2,20 m/s	6,5 m/s	0,34	0,11 A	24,5 V	2,70 W	119,13 W	2,26%
130 1/min	4,08 m/s	7,5 m/s	0,54	0,43 A	24,6 V	10,58 W	183,01 W	5,78%
88 1/min	2,76 m/s	7,3 m/s	0,38	0,17 A	24,5 V	4,17 W	168,76 W	2,47%
110 1/min	3,46 m/s	7,5 m/s	0,46	0,26 A	24,6 V	6,40 W	183,01 W	3,49%
100 1/min	3,14 m/s	7,8 m/s	0,40	0,28 A	24,6 V	6,89 W	205,86 W	3,35%
60 1/min	1,88 m/s	5,8 m/s	0,32	0,08 A	24,5 V	1,96 W	84,64 W	2,32%
120 1/min	3,77 m/s	7,7 m/s	0,49	0,36 A	24,6 V	8,86 W	198,04 W	4,47%
98 1/min	3,08 m/s	6,8 m/s	0,45	0,24 A	24,6 V	5,90 W	136,40 W	4,33%
50 1/min	1,57 m/s	5,0 m/s	0,31	0,02 A	24,5 V	0,49 W	54,23 W	0,90%
65 1/min	2,04 m/s	5,6 m/s	0,36	0,07 A	24,5 V	1,72 W	76,18 W	2,25%
58 1/min	1,82 m/s	5,4 m/s	0,34	0,04 A	24,5 V	0,98 W	68,31 W	1,43%
65 1/min	2,04 m/s	7,4 m/s	0,28	0,11 A	24,5 V	2,70 W	175,79 W	1,53%
72 1/min	2,26 m/s	7,5 m/s	0,30	0,14 A	24,6 V	3,44 W	183,01 W	1,88%
82 1/min	2,58 m/s	7,5 m/s	0,34	0,15 A	24,6 V	3,69 W	183,01 W	2,02%
90 1/min	2,83 m/s	7,6 m/s	0,37	0,21 A	24,6 V	5,17 W	190,43 W	2,71%
170 1/min	5,34 m/s	9,8 m/s	0,54	0,62 A	24,7 V	15,31 W	408,29 W	3,75%
145 1/min	4,56 m/s	8,8 m/s	0,52	0,51 A	24,7 V	12,60 W	295,62 W	4,26%
65 1/min	2,04 m/s	6,3 m/s	0,32	0,10 A	24,6 V	2,46 W	108,47 W	2,27%
74 1/min	2,32 m/s	7,0 m/s	0,33	0,12 A	24,6 V	2,95 W	148,79 W	1,98%
65 1/min	2,04 m/s	7,0 m/s	0,29	0,06 A	24,6 V	1,48 W	148,79 W	0,99%
92 1/min	2,89 m/s	8,0 m/s	0,36	0,19 A	24,6 V	4,67 W	222,11 W	2,10%
120 1/min	3,77 m/s	8,0 m/s	0,47	0,34 A	24,6 V	8,36 W	222,11 W	3,77%
80 1/min	2,51 m/s	8,0 m/s	0,31	0,16 A	24,6 V	3,94 W	222,11 W	1,77%
102 1/min	3,20 m/s	7,5 m/s	0,43	0,28 A	24,6 V	6,89 W	183,01 W	3,76%
116 1/min	3,64 m/s	9,0 m/s	0,40	0,31 A	24,6 V	7,63 W	316,24 W	2,41%
80 1/min	2,51 m/s	8,3 m/s	0,30	0,14 A	24,6 V	3,44 W	248,04 W	1,39%
165 1/min	5,18 m/s	9,0 m/s	0,58	0,63 A	24,7 V	15,56 W	316,24 W	4,92%
240 1/min	7,54 m/s	9,5 m/s	0,79	0,99 A	24,7 V	24,45 W	371,93 W	6,57%
230 1/min	7,23 m/s	8,5 m/s	0,85	0,63 A	24,8 V	15,62 W	266,41 W	5,86%
180 1/min	5,65 m/s	9,0 m/s	0,63	0,68 A	24,7 V	16,80 W	316,24 W	5,31%
105 1/min	3,30 m/s	8,4 m/s	0,39	0,25 A	24,7 V	6,18 W	257,11 W	2,40%
70 1/min	2,20 m/s	7,5 m/s	0,29	0,07 A	24,6 V	1,72 W	183,01 W	0,94%
78 1/min	2,45 m/s	7,5 m/s	0,33	0,13 A	24,6 V	3,20 W	183,01 W	1,75%
76 1/min	2,39 m/s	7,3 m/s	0,33	0,13 A	24,6 V	3,20 W	168,76 W	1,90%
78 1/min	2,45 m/s	7,2 m/s	0,34	0,14 A	24,6 V	3,44 W	161,91 W	2,13%
75 1/min	2,36 m/s	6,0 m/s	0,39	0,18 A	24,6 V	4,43 W	93,70 W	4,73%

130 1/min	4,08 m/s	8,5 m/s	0,48	0,33 A	24,7 V	8,15 W	266,41 W	3,06%
155 1/min	4,87 m/s	9,5 m/s	0,51	0,42 A	24,7 V	10,37 W	371,93 W	2,79%
382 1/min	12,00 m/s	11,0 m/s	1,09	1,54 A	24,9 V	38,35 W	577,39 W	6,64%
180 1/min	5,65 m/s	9,0 m/s	0,63	0,71 A	24,8 V	17,61 W	316,24 W	5,57%
230 1/min	7,23 m/s	10,0 m/s	0,72	0,90 A	24,8 V	22,32 W	433,80 W	5,15%
240 1/min	7,54 m/s	10,3 m/s	0,73	0,53 A	24,8 V	13,14 W	474,02 W	2,77%
228 1/min	7,16 m/s	10,8 m/s	0,66	0,76 A	24,8 V	18,85 W	546,46 W	3,45%
262 1/min	8,23 m/s	10,0 m/s	0,82	1,00 A	24,8 V	24,80 W	433,80 W	5,72%
224 1/min	7,04 m/s	8,5 m/s	0,83	0,70 A	24,8 V	17,36 W	266,41 W	6,52%
138 1/min	4,34 m/s	8,0 m/s	0,54	0,36 A	24,8 V	8,93 W	222,11 W	4,02%
200 1/min	6,28 m/s	9,0 m/s	0,70	0,86 A	24,8 V	21,33 W	316,24 W	6,74%
230 1/min	7,23 m/s	8,0 m/s	0,90	0,76 A	24,8 V	18,85 W	222,11 W	8,49%
220 1/min	6,91 m/s	10,0 m/s	0,69	0,74 A	24,8 V	18,35 W	433,80 W	4,23%
215 1/min	6,75 m/s	9,1 m/s	0,74	0,80 A	24,9 V	19,92 W	326,90 W	6,09%
190 1/min	5,97 m/s	8,9 m/s	0,67	0,48 A	24,8 V	11,90 W	305,82 W	3,89%
130 1/min	4,08 m/s	7,8 m/s	0,52	0,30 A	24,7 V	7,41 W	205,86 W	3,60%
115 1/min	3,61 m/s	8,0 m/s	0,45	0,31 A	24,7 V	7,66 W	222,11 W	3,45%
70 1/min	2,20 m/s	7,0 m/s	0,31	0,10 A	24,7 V	2,47 W	148,79 W	1,66%
160 1/min	5,03 m/s	9,0 m/s	0,56	0,59 A	24,8 V	14,63 W	316,24 W	4,63%
170 1/min	5,34 m/s	9,2 m/s	0,58	0,47 A	24,8 V	11,66 W	337,79 W	3,45%
240 1/min	7,54 m/s	10,8 m/s	0,70	1,01 A	24,9 V	25,15 W	546,46 W	4,60%
255 1/min	8,01 m/s	10,0 m/s	0,80	1,23 A	24,9 V	30,63 W	433,80 W	7,06%
230 1/min	7,23 m/s	9,5 m/s	0,76	0,89 A	24,9 V	22,16 W	371,93 W	5,96%
170 1/min	5,34 m/s	8,0 m/s	0,67	0,67 A	24,8 V	16,62 W	222,11 W	7,48%
150 1/min	4,71 m/s	8,5 m/s	0,55	0,52 A	24,8 V	12,90 W	266,41 W	4,84%
120 1/min	3,77 m/s	8,0 m/s	0,47	0,35 A	24,8 V	8,68 W	222,11 W	3,91%
200 1/min	6,28 m/s	9,5 m/s	0,66	0,73 A	24,8 V	18,10 W	371,93 W	4,87%
210 1/min	6,60 m/s	9,7 m/s	0,68	0,83 A	24,9 V	20,67 W	395,92 W	5,22%
215 1/min	6,75 m/s	9,2 m/s	0,73	0,88 A	24,9 V	21,91 W	337,79 W	6,49%
205 1/min	6,44 m/s	9,2 m/s	0,70	0,83 A	24,9 V	20,67 W	337,79 W	6,12%
180 1/min	5,65 m/s	7,5 m/s	0,75	0,67 A	24,9 V	16,68 W	183,01 W	9,12%
140 1/min	4,40 m/s	7,0 m/s	0,63	0,69 A	24,9 V	17,18 W	148,79 W	11,55%
170 1/min	5,34 m/s	9,0 m/s	0,59	0,65 A	24,9 V	16,19 W	316,24 W	5,12%
150 1/min	4,71 m/s	8,0 m/s	0,59	0,47 A	24,8 V	11,66 W	222,11 W	5,25%
130 1/min	4,08 m/s	8,5 m/s	0,48	0,45 A	24,8 V	11,16 W	266,41 W	4,19%
200 1/min	6,28 m/s	9,5 m/s	0,66	0,65 A	24,8 V	16,12 W	371,93 W	4,33%
145 1/min	4,56 m/s	8,8 m/s	0,52	0,47 A	24,8 V	11,66 W	295,62 W	3,94%
210 1/min	6,60 m/s	10,0 m/s	0,66	0,85 A	24,9 V	21,17 W	433,80 W	4,88%
200 1/min	6,28 m/s	9,5 m/s	0,66	0,75 A	24,9 V	18,68 W	371,93 W	5,02%
65 1/min	2,04 m/s	6,3 m/s	0,32	0,12 A	24,8 V	2,98 W	108,47 W	2,74%
80 1/min	2,51 m/s	5,0 m/s	0,50	0,12 A	24,8 V	2,98 W	54,23 W	5,49%
180 1/min	5,65 m/s	8,3 m/s	0,68	0,67 A	24,9 V	16,68 W	248,04 W	6,73%
70 1/min	2,20 m/s	6,0 m/s	0,37	0,07 A	24,8 V	1,74 W	93,70 W	1,85%

MPPT mit 2 Änderungen pro Sekunde

Rotordrehzahl	Rotorum-fangsgeschw.	Windge-schwin-digkeiten	Schnell-laufzahl	Strom am Akku	Spannung am Akku	el. Leistung MPPT	Leistung Luftstrom durch Rotor-Querschnitt	el. Wirkungsgrad Savonius mit MPPT
75 1/min	2,36 m/s	7,6 m/s	0,31	0,14 A	24,7 V	3,46 W	190,43 W	1,82%
58 1/min	1,82 m/s	6,0 m/s	0,30	0,04 A	24,7 V	0,99 W	93,70 W	1,05%
84 1/min	2,64 m/s	6,8 m/s	0,39	0,45 A	25,2 V	11,34 W	136,40 W	8,31%
139 1/min	4,37 m/s	8,0 m/s	0,55	0,18 A	24,5 V	4,41 W	222,11 W	1,99%
208 1/min	6,53 m/s	8,8 m/s	0,74	0,52 A	25,0 V	13,00 W	295,62 W	4,40%
224 1/min	7,04 m/s	9,2 m/s	0,76	0,64 A	25,4 V	16,26 W	337,79 W	4,81%
262 1/min	8,23 m/s	9,4 m/s	0,88	0,78 A	25,7 V	20,05 W	360,31 W	5,56%
226 1/min	7,10 m/s	8,2 m/s	0,87	0,71 A	25,8 V	18,32 W	239,18 W	7,66%
268 1/min	8,42 m/s	7,2 m/s	1,17	0,51 A	25,4 V	12,95 W	161,91 W	8,00%
70 1/min	2,20 m/s	7,1 m/s	0,31	0,10 A	25,0 V	2,50 W	155,26 W	1,61%
88 1/min	2,76 m/s	7,0 m/s	0,39	0,10 A	25,0 V	2,50 W	148,79 W	1,68%
149 1/min	4,68 m/s	8,8 m/s	0,53	0,15 A	25,0 V	3,75 W	295,62 W	1,27%
116 1/min	3,64 m/s	7,6 m/s	0,48	0,54 A	25,3 V	13,66 W	190,43 W	7,17%
97 1/min	3,05 m/s	7,2 m/s	0,42	0,28 A	25,2 V	7,06 W	161,91 W	4,36%
134 1/min	4,21 m/s	8,4 m/s	0,50	0,45 A	25,2 V	11,34 W	257,11 W	4,41%
172 1/min	5,40 m/s	7,9 m/s	0,68	0,55 A	25,2 V	13,86 W	213,88 W	6,48%
202 1/min	6,35 m/s	9,1 m/s	0,70	0,68 A	25,5 V	17,34 W	326,90 W	5,30%
220 1/min	6,91 m/s	9,4 m/s	0,74	0,95 A	26,0 V	24,70 W	360,31 W	6,86%
248 1/min	7,79 m/s	9,2 m/s	0,85	1,17 A	26,2 V	30,65 W	337,79 W	9,07%
284 1/min	8,92 m/s	8,5 m/s	1,05	0,93 A	26,3 V	24,46 W	266,41 W	9,18%
248 1/min	7,79 m/s	10,0 m/s	0,78	0,97 A	26,2 V	25,41 W	433,80 W	5,86%
222 1/min	6,97 m/s	8,3 m/s	0,84	0,59 A	25,6 V	15,10 W	248,04 W	6,09%
166 1/min	5,22 m/s	9,6 m/s	0,54	0,74 A	25,5 V	18,87 W	383,80 W	4,92%
261 1/min	8,20 m/s	9,2 m/s	0,89	0,95 A	26,3 V	24,99 W	337,79 W	7,40%
123 1/min	3,86 m/s	8,2 m/s	0,47	0,30 A	25,1 V	7,53 W	239,18 W	3,15%
114 1/min	3,58 m/s	9,0 m/s	0,40	0,29 A	25,2 V	7,31 W	316,24 W	2,31%
292 1/min	9,17 m/s	10,3 m/s	0,89	1,19 A	25,9 V	30,82 W	474,02 W	6,50%
234 1/min	7,35 m/s	8,0 m/s	0,92	0,20 A	24,9 V	4,98 W	222,11 W	2,24%
232 1/min	7,29 m/s	8,4 m/s	0,87	0,54 A	25,6 V	13,82 W	257,11 W	5,38%
172 1/min	5,40 m/s	6,5 m/s	0,83	0,44 A	25,2 V	11,09 W	119,13 W	9,31%
160 1/min	5,03 m/s	8,1 m/s	0,62	0,51 A	25,2 V	12,85 W	230,54 W	5,57%
272 1/min	8,55 m/s	9,8 m/s	0,87	0,96 A	26,0 V	24,96 W	408,29 W	6,11%
256 1/min	8,04 m/s	8,8 m/s	0,91	0,98 A	25,9 V	25,38 W	295,62 W	8,59%
250 1/min	7,85 m/s	8,3 m/s	0,95	1,00 A	26,0 V	26,00 W	248,04 W	10,48%
256 1/min	8,04 m/s	8,4 m/s	0,96	0,83 A	26,2 V	21,75 W	257,11 W	8,46%
194 1/min	6,09 m/s	8,0 m/s	0,76	0,80 A	25,3 V	20,24 W	222,11 W	9,11%
136 1/min	4,27 m/s	8,2 m/s	0,52	0,45 A	25,0 V	11,25 W	239,18 W	4,70%
127 1/min	3,99 m/s	7,1 m/s	0,56	0,30 A	25,0 V	7,50 W	155,26 W	4,83%
152 1/min	4,78 m/s	7,7 m/s	0,62	0,35 A	25,1 V	8,79 W	198,04 W	4,44%
141 1/min	4,43 m/s	7,1 m/s	0,62	0,42 A	25,2 V	10,58 W	155,26 W	6,82%
124 1/min	3,90 m/s	8,3 m/s	0,47	0,31 A	25,0 V	7,75 W	248,04 W	3,12%
149 1/min	4,68 m/s	8,2 m/s	0,57	0,54 A	25,3 V	13,66 W	239,18 W	5,71%

165 1/min	5,18 m/s	7,5 m/s	0,69	0,41 A	25,2 V	10,33 W	183,01 W	5,65%
157 1/min	4,93 m/s	6,9 m/s	0,71	0,44 A	25,3 V	11,13 W	142,51 W	7,81%
111 1/min	3,49 m/s	8,1 m/s	0,43	0,36 A	25,0 V	9,00 W	230,54 W	3,90%
173 1/min	5,43 m/s	7,8 m/s	0,70	0,61 A	25,3 V	15,43 W	205,86 W	7,50%
198 1/min	6,22 m/s	7,5 m/s	0,83	0,84 A	25,3 V	21,25 W	183,01 W	11,61%
220 1/min	6,91 m/s	9,0 m/s	0,77	0,71 A	25,3 V	17,96 W	316,24 W	5,68%
292 1/min	9,17 m/s	9,3 m/s	0,99	1,07 A	26,4 V	28,25 W	348,93 W	8,10%
222 1/min	6,97 m/s	7,6 m/s	0,92	0,73 A	25,6 V	18,69 W	190,43 W	9,81%
192 1/min	6,03 m/s	8,0 m/s	0,75	0,50 A	25,5 V	12,75 W	222,11 W	5,74%
217 1/min	6,82 m/s	7,5 m/s	0,91	0,18 A	25,2 V	4,54 W	183,01 W	2,48%
124 1/min	3,90 m/s	8,5 m/s	0,46	0,60 A	25,0 V	15,00 W	266,41 W	5,63%
258 1/min	8,11 m/s	9,5 m/s	0,85	0,56 A	25,2 V	14,11 W	371,93 W	3,79%
190 1/min	5,97 m/s	8,5 m/s	0,70	0,46 A	25,4 V	11,68 W	266,41 W	4,39%
206 1/min	6,47 m/s	8,2 m/s	0,79	0,34 A	25,2 V	8,57 W	239,18 W	3,58%
213 1/min	6,69 m/s	8,0 m/s	0,84	0,60 A	25,6 V	15,36 W	222,11 W	6,92%

MPPT mit 5 Änderungen pro Sekunde

Rotordrehzahl	Rotorum-fangsgeschw.	Windge-schwin-digkeiten	Schnell-laufzahl	Strom am Akku	Spannung am Akku	el. Leistung MPPT	Leistung Luftstrom durch Rotor-querschnitt	el. Wirkungsgrad Savonius mit MPPT
70 1/min	2,20 m/s	6,0 m/s	0,37	0,01 A	24,5 V	0,25 W	93,70 W	0,26%
100 1/min	3,14 m/s	7,0 m/s	0,45	0,30 A	24,5 V	7,35 W	148,79 W	4,94%
66 1/min	2,07 m/s	6,0 m/s	0,35	0,13 A	24,6 V	3,20 W	93,70 W	3,41%
180 1/min	5,65 m/s	9,8 m/s	0,58	0,70 A	24,7 V	17,29 W	408,29 W	4,23%
264 1/min	8,29 m/s	10,0 m/s	0,83	1,17 A	25,0 V	29,25 W	433,80 W	6,74%
296 1/min	9,30 m/s	9,6 m/s	0,97	1,16 A	25,0 V	29,00 W	383,80 W	7,56%
61 1/min	1,92 m/s	7,0 m/s	0,27	0,09 A	24,5 V	2,21 W	148,79 W	1,48%
72 1/min	2,26 m/s	7,2 m/s	0,31	0,14 A	24,5 V	3,43 W	161,91 W	2,12%
108 1/min	3,39 m/s	8,6 m/s	0,39	0,24 A	24,7 V	5,93 W	275,92 W	2,15%
56 1/min	1,76 m/s	6,8 m/s	0,26	0,01 A	24,7 V	0,25 W	136,40 W	0,18%
70 1/min	2,20 m/s	7,0 m/s	0,31	0,13 A	24,7 V	3,21 W	148,79 W	2,16%
70 1/min	2,20 m/s	7,0 m/s	0,31	0,12 A	24,7 V	2,96 W	148,79 W	1,99%
80 1/min	2,51 m/s	8,0 m/s	0,31	0,15 A	24,7 V	3,71 W	222,11 W	1,67%
121 1/min	3,80 m/s	9,0 m/s	0,42	0,49 A	24,9 V	12,20 W	316,24 W	3,86%
204 1/min	6,41 m/s	9,2 m/s	0,70	0,78 A	25,3 V	19,73 W	337,79 W	5,84%
192 1/min	6,03 m/s	7,3 m/s	0,83	0,48 A	25,2 V	12,10 W	168,76 W	7,17%
115 1/min	3,61 m/s	8,7 m/s	0,42	0,18 A	24,8 V	4,46 W	285,66 W	1,56%
158 1/min	4,96 m/s	7,7 m/s	0,64	0,55 A	25,1 V	13,81 W	198,04 W	6,97%
120 1/min	3,77 m/s	8,5 m/s	0,44	0,23 A	24,9 V	5,73 W	266,41 W	2,15%
112 1/min	3,52 m/s	7,3 m/s	0,48	0,32 A	24,9 V	7,97 W	168,76 W	4,72%
122 1/min	3,83 m/s	7,0 m/s	0,55	0,30 A	24,9 V	7,47 W	148,79 W	5,02%

MPPT mit 12 Änderungen pro Sekunde

Rotordrehzahl	Rotorum-fangsgeschw.	Windge-schwin-digkeiten	Schnell-laufzahl	Strom am Akku	Spannung am Akku	el. Leistung MPPT	Leistung Luftstrom durch Rotor-querschnitt	el. Wirkungsgrad Savonius mit MPPT
114 1/min	3,58 m/s	8,5 m/s	0,42	0,32 A	25,0 V	8,00 W	266,41 W	3,00%
194 1/min	6,09 m/s	8,5 m/s	0,72	0,74 A	25,6 V	18,94 W	266,41 W	7,11%
148 1/min	4,65 m/s	8,1 m/s	0,57	0,55 A	25,5 V	14,03 W	230,54 W	6,08%
247 1/min	7,76 m/s	9,0 m/s	0,86	1,03 A	26,2 V	26,99 W	316,24 W	8,53%
148 1/min	4,65 m/s	7,6 m/s	0,61	0,53 A	25,3 V	13,41 W	190,43 W	7,04%
150 1/min	4,71 m/s	7,2 m/s	0,65	0,44 A	25,3 V	11,13 W	161,91 W	6,88%
152 1/min	4,78 m/s	8,4 m/s	0,57	0,68 A	25,6 V	17,41 W	257,11 W	6,77%
198 1/min	6,22 m/s	8,6 m/s	0,72	0,78 A	25,6 V	19,97 W	275,92 W	7,24%
270 1/min	8,48 m/s	8,8 m/s	0,96	0,98 A	26,5 V	25,97 W	295,62 W	8,78%
238 1/min	7,48 m/s	9,0 m/s	0,83	0,87 A	26,5 V	23,06 W	316,24 W	7,29%
203 1/min	6,38 m/s	8,0 m/s	0,80	0,69 A	26,1 V	18,01 W	222,11 W	8,11%
148 1/min	4,65 m/s	6,0 m/s	0,77	0,41 A	25,5 V	10,46 W	93,70 W	11,16%
222 1/min	6,97 m/s	9,2 m/s	0,76	0,92 A	26,5 V	24,38 W	337,79 W	7,22%
129 1/min	4,05 m/s	7,8 m/s	0,52	0,30 A	25,4 V	7,62 W	205,86 W	3,70%
226 1/min	7,10 m/s	8,6 m/s	0,83	0,73 A	25,9 V	18,91 W	275,92 W	6,85%
218 1/min	6,85 m/s	8,2 m/s	0,84	0,81 A	26,4 V	21,38 W	239,18 W	8,94%
196 1/min	6,16 m/s	8,2 m/s	0,75	0,67 A	26,1 V	17,49 W	239,18 W	7,31%
185 1/min	5,81 m/s	7,8 m/s	0,75	0,57 A	25,8 V	14,71 W	205,86 W	7,14%
263 1/min	8,26 m/s	9,3 m/s	0,89	1,22 A	26,8 V	32,70 W	348,93 W	9,37%
210 1/min	6,60 m/s	7,4 m/s	0,89	0,77 A	26,4 V	20,33 W	175,79 W	11,56%
108 1/min	3,39 m/s	8,1 m/s	0,42	0,31 A	25,2 V	7,81 W	230,54 W	3,39%
121 1/min	3,80 m/s	7,6 m/s	0,50	0,34 A	25,3 V	8,60 W	190,43 W	4,52%
117 1/min	3,68 m/s	7,8 m/s	0,47	0,34 A	25,3 V	8,60 W	205,86 W	4,18%
94 1/min	2,95 m/s	7,2 m/s	0,41	0,22 A	25,4 V	5,59 W	161,91 W	3,45%
101 1/min	3,17 m/s	7,0 m/s	0,45	0,26 A	25,4 V	6,60 W	148,79 W	4,44%
149 1/min	4,68 m/s	8,5 m/s	0,55	0,57 A	25,7 V	14,65 W	266,41 W	5,50%
160 1/min	5,03 m/s	7,3 m/s	0,69	0,50 A	25,7 V	12,85 W	168,76 W	7,61%
172 1/min	5,40 m/s	8,1 m/s	0,67	0,66 A	25,7 V	16,96 W	230,54 W	7,36%
184 1/min	5,78 m/s	7,6 m/s	0,76	0,63 A	26,0 V	16,38 W	190,43 W	8,60%
158 1/min	4,96 m/s	7,1 m/s	0,70	0,54 A	25,7 V	13,88 W	155,26 W	8,94%
155 1/min	4,87 m/s	9,0 m/s	0,54	0,46 A	25,4 V	11,68 W	316,24 W	3,69%
218 1/min	6,85 m/s	8,1 m/s	0,85	0,77 A	26,1 V	20,10 W	230,54 W	8,72%
200 1/min	6,28 m/s	8,4 m/s	0,75	0,64 A	26,1 V	16,70 W	257,11 W	6,50%
246 1/min	7,73 m/s	8,1 m/s	0,95	0,83 A	26,6 V	22,08 W	230,54 W	9,58%
230 1/min	7,23 m/s	9,1 m/s	0,79	0,78 A	26,6 V	20,75 W	326,90 W	6,35%
254 1/min	7,98 m/s	9,1 m/s	0,88	0,89 A	26,7 V	23,76 W	326,90 W	7,27%
232 1/min	7,29 m/s	8,0 m/s	0,91	0,58 A	26,5 V	15,37 W	222,11 W	6,92%
243 1/min	7,63 m/s	8,2 m/s	0,93	0,99 A	26,6 V	26,33 W	239,18 W	11,01%
252 1/min	7,92 m/s	8,1 m/s	0,98	0,96 A	26,8 V	25,73 W	230,54 W	11,16%
137 1/min	4,30 m/s	8,1 m/s	0,53	0,42 A	25,1 V	10,54 W	230,54 W	4,57%
200 1/min	6,28 m/s	8,3 m/s	0,76	0,78 A	25,4 V	19,81 W	248,04 W	7,99%
214 1/min	6,72 m/s	8,3 m/s	0,81	0,75 A	25,7 V	19,28 W	248,04 W	7,77%

260 1/min	8,17 m/s	9,5 m/s	0,86	1,15 A	26,6 V	30,59 W	371,93 W	8,22%
271 1/min	8,51 m/s	10,0 m/s	0,85	0,97 A	26,7 V	25,90 W	433,80 W	5,97%
266 1/min	8,36 m/s	8,3 m/s	1,01	0,79 A	26,7 V	21,09 W	248,04 W	8,50%
226 1/min	7,10 m/s	8,8 m/s	0,81	0,81 A	26,5 V	21,47 W	295,62 W	7,26%
202 1/min	6,35 m/s	8,1 m/s	0,78	0,78 A	26,3 V	20,51 W	230,54 W	8,90%
156 1/min	4,90 m/s	6,7 m/s	0,73	0,44 A	25,7 V	11,31 W	130,47 W	8,67%

Anhang F:

Konstruktionszeichnungen

26 Seiten

+ Stückliste

Anhang G:

Schaltplan & Platinenlayout

Lüfterschaltplan

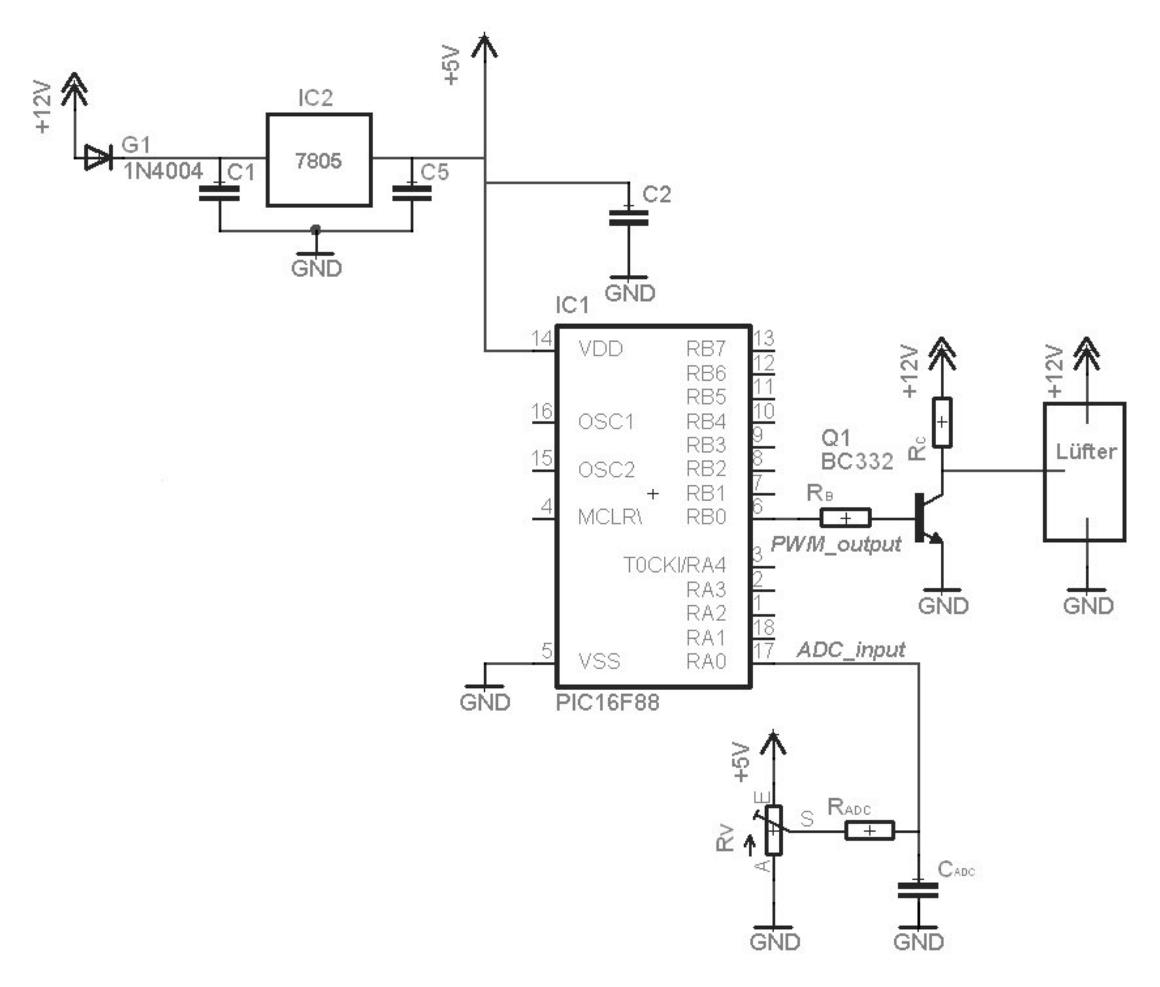


Abb. 78 Lüfterschaltplan

Bezeichnung	**Bauteil**
IC1	PIC16F88
IC2	MC 7805 CT NL GO310
G1	Diode
C1	Elko 100µF / 35V
C2, C5	µ1 C 684J
C_{ADC}	µ22 k63
Rv	Potentiometer 25k 216M
LK	Lusterklemme MKDSN 1,5-5,08
Q1	Transistor BC 332 -25
R1	22 000 Ω ±1%
R4, R_{ADC}, R_B, R_C	11 000 Ω ±1% ±50ppm/℃

Lüfterlayout

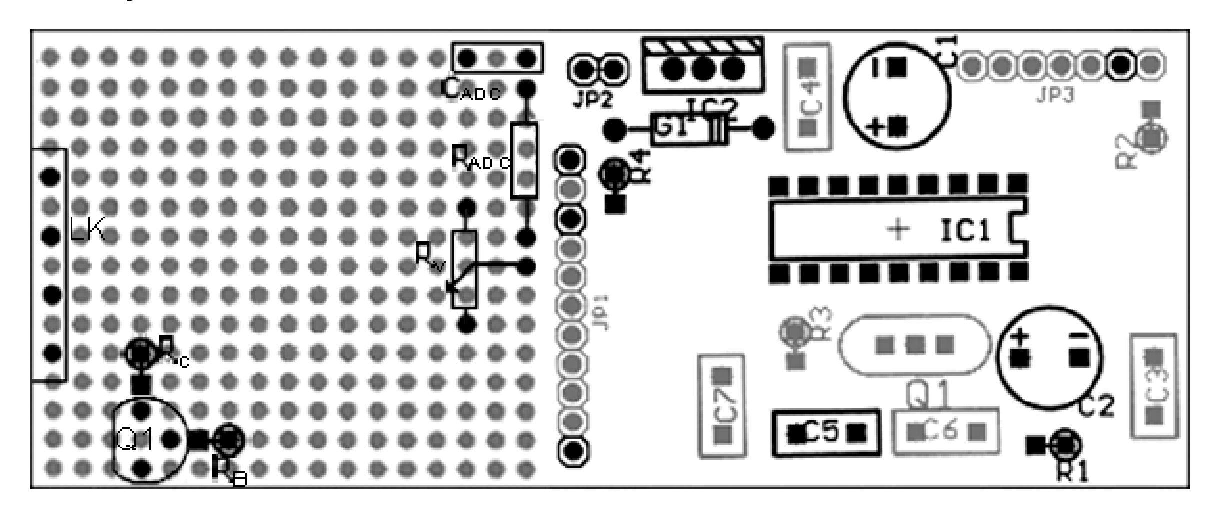


Abb. 79 Lüfterplatinenlayout

Verwendeter MPPT-Schaltplan A3

Optimierter MPPT-Schaltplan A3

Verwendetes MPPT-Layout

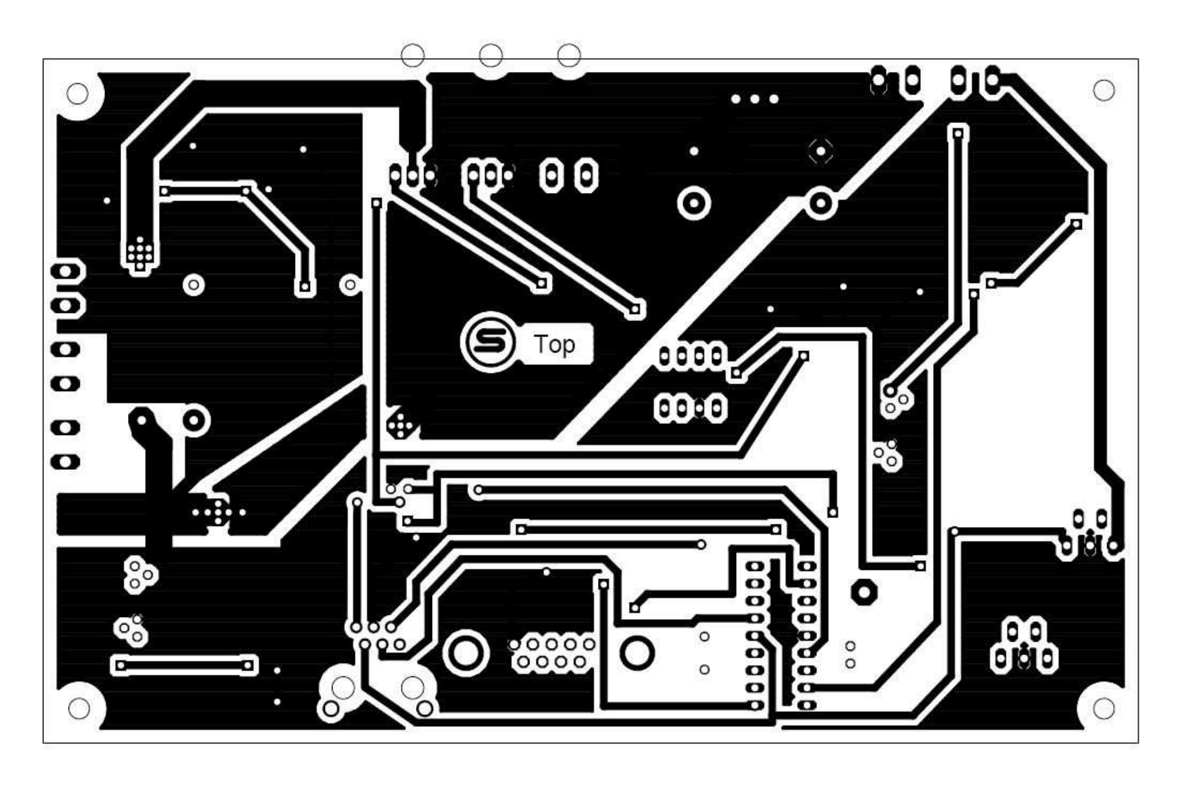


Abb. 80 Verwendetes Layout Top

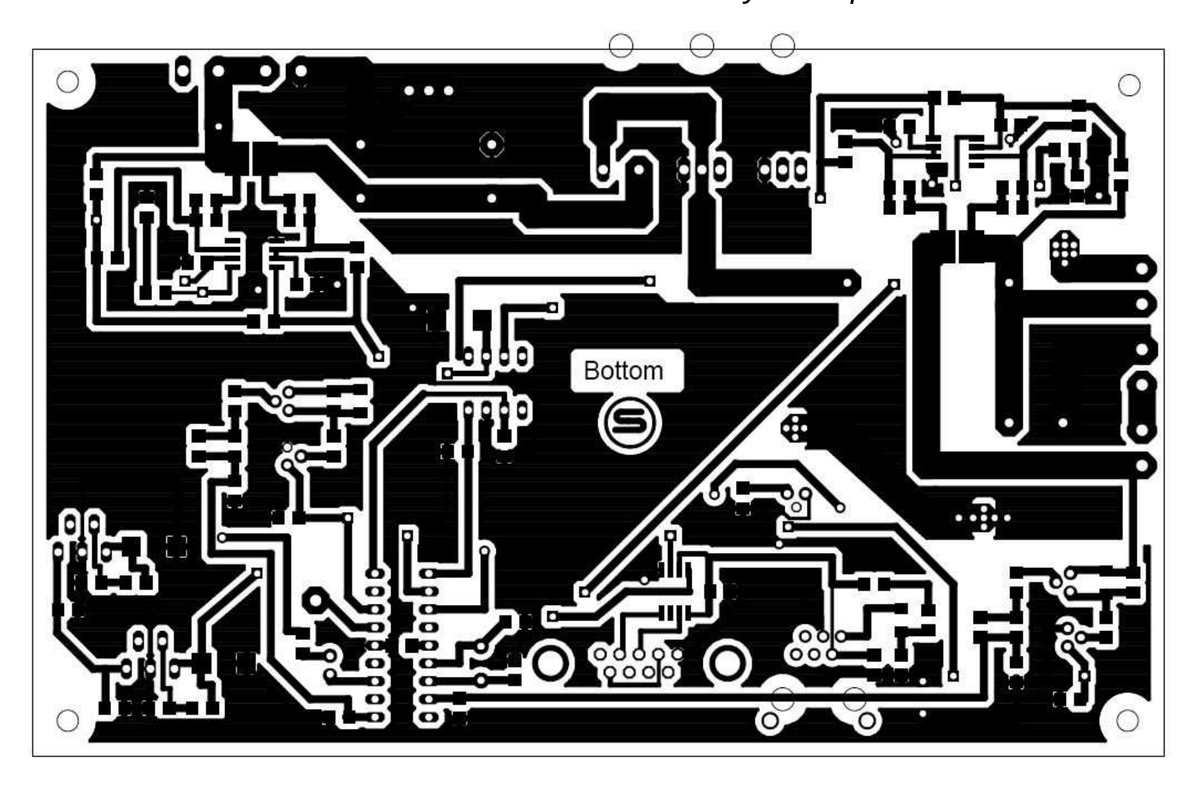


Abb. 81 Verwendetes Layout Bottom

Optimiertes MPPT-Layout

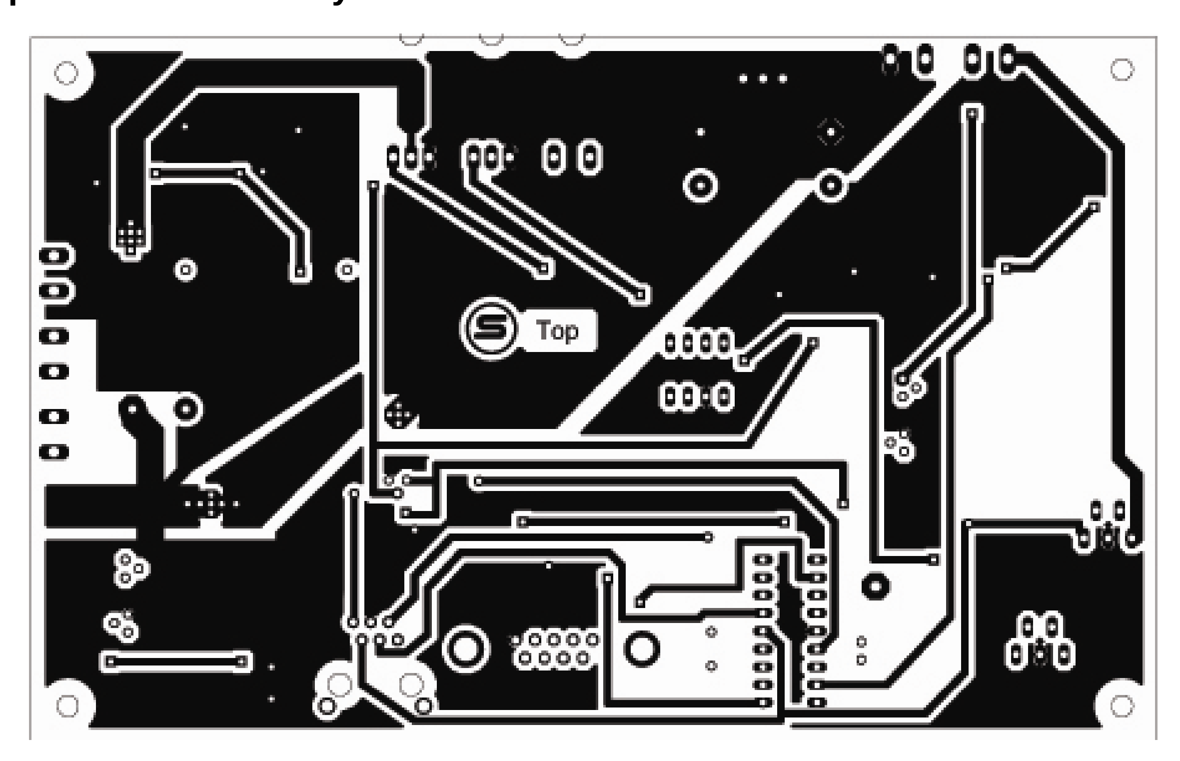


Abb. 82 Optimiertes Layout Top

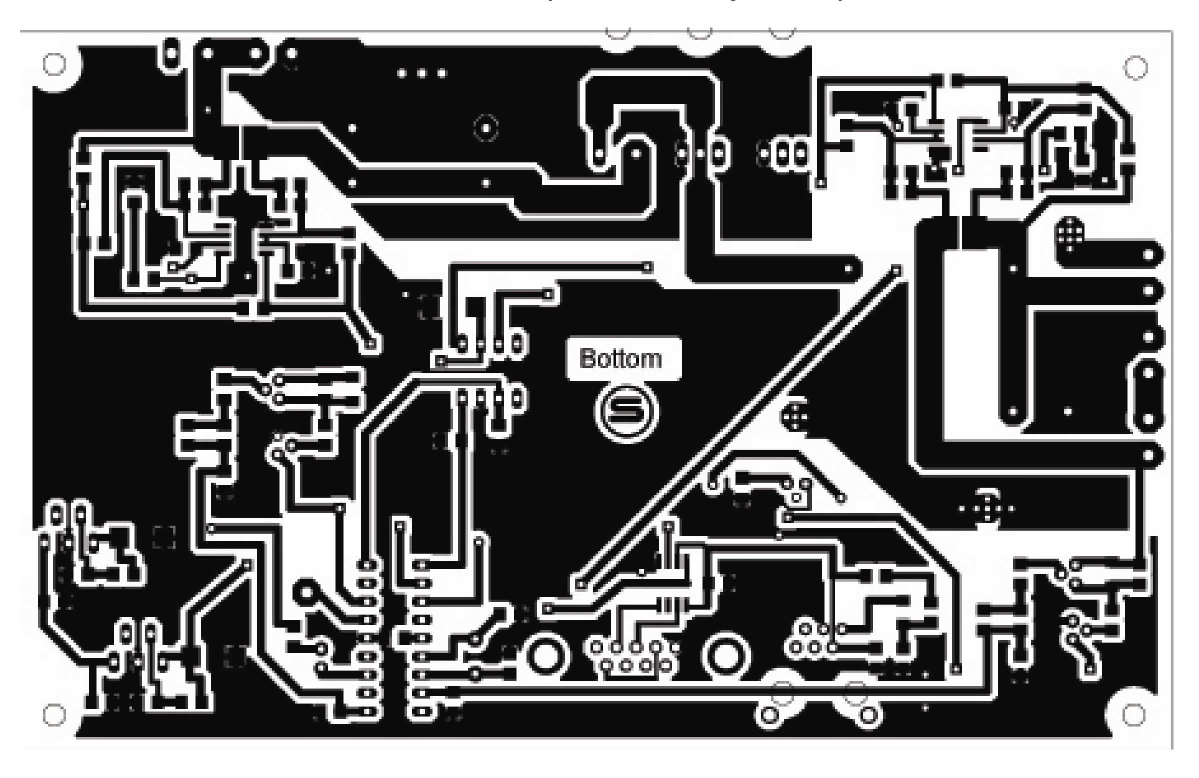


Abb. 83 Optimiertes Layout Bottom

Layoutfertigungstipps

Da während der Layoutentwicklung viele Fehler durch Unwissen und Unachtsamkeiten auftreten könnten, sollen die weiteren Beschreibungen als Tipps und Hinweise einen Überblick schaffen.

Leitungen: Dicke, Länge, Typ beachten

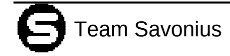
Die vielleicht wichtigste Grundregel beim Entwurf einer Leiterplatte lautet, alle Leitungen möglichst kurz aber dick auszuführen. Breite kurze Bahnen verursachen nur geringe Leitungswiderstände und erwärmen sich auch bei großen Strömen kaum. Weiters muss man bedenken, dass bei einer beidseitig bestückten Platine ein Unterschied zwischen Bauteilseite und Lötseite gemacht werden muss. Alle bedrahteten Bauteile werden auf der Bauteilseite bestückt, die Lötstellen und Anschlüsse werden aber über Bohrungen auf die Gegenüberseite verlegt. Auf der Lötseite platziert man möglichst alle SMD-Bauteile, als Folge daraus befindet sich auf dieser Seite auch der Großteil der Leiterbahnen.

Weitere Design-Regeln beziehen sich hauptsächlich auf die Verlegung verschiedener Leitungstypen. Versorgungsleitungen sollten auf jeden Fall möglichst dick ausgeführt werden. Weiters ist die Verlegung von PWM-Leitungen wichtig. Pulsweitenmodulierte (PWM) Signalleitungen müssen möglichst kurz gehalten werden, außerdem dürfen sie nicht parallel zu analogen Messleitungen verlegt werden und sollten nur wenig bis gar keine Kreuzungen beinhalten. Weiters muss darauf geachtet werden, Messleitungen ebenfalls kurz und störungsfrei zu verlegen, um große Messfehler vermeiden zu können.

Leiterplattengröße – Eagle-Versionen

Gleich zu Beginn der Designentwicklung musste die Leiterplattengröße in Eagle eingestellt werden, um danach mit dem Platzieren der Bauteile beginnen zu können. Es wurde für unsere Maximum Power Point Tracker - Schaltung eine Europlatine mit den Abmaßen 160 mm x 100 mm ausgewählt, denn bei dieser Größe konnten alle Leiterbahnen gut verlegt werden und es bleibt Platz für Kühlkörper und große Bauteile wie Spule und Kondensatoren. Um mit Eagle eine Leiterplatte in der Größe einer Europlatine entwerfen zu können, benötigt man bereits den License-Key für die Standard-Edition. Bei Eagle unterscheidet man zwischen mehreren Editionen, die je nach Ausführung mehr oder weniger Einschränkungen haben und dadurch für bestimmte Benutzergruppen bestimmt sind. Mit dem Freeware-Key erhält man nach der Installation die Light Edition und ist damit auf eine Platinenfläche von 100 mm x 80 mm (=halbe Europlatine) beschränkt. Außerdem stehen nur zwei Signal-Layer (Top und Bottom) zur Verfügung und ein Schaltplan kann nur aus einem einzelnen Sheet bestehen. Mit der Standard Edition, welche für das MPPT-Layout benötigt wurde, wird die Platinenfläche auf 160 mm x 100 mm erhöht (=ganze Europlatine) und es stehen weiters vier Signal-Layer (Top, Route2, Route15 und Bottom) zur Verfügung. Ohne jegliche Beschränkungen kann man mit der Professional Edition von Eagle arbeiten. Für das MPPT-Layout werden zwei Signal-Layer Top und Bottom auf einer Europlatinenfläche verwendet.

Schaltungskomponenten ordnen



Als nächster Schritt wurden alle Bauteile in passenden Gruppen auf der Leiterplatte zugeordnet, um später ein schnelleres Routen der Leiterbahnen zu ermöglichen. Dabei kann man durch Eintippen der Bauteilbezeichnung in der Befehlsleiste von Eagle schell die passenden Bauteile suchen und so wichtige Baugruppen zuerst platzieren. Zu Beginn wurden alle Komponenten der Strommessungen, der Spannungsmessungen und die Leistungsbauteile zusammen gesucht. Alle Leitungen des Step-Up Converters müssen höhere Ströme und Leistungen aushalten, das heißt sie sollten dick genug sein um sich nicht zu stark zu erwärmen. Es wurden für das Layout Leiterbahndicken von bis zu 4 mm Stärke verwendet. Weiters soll der Leistungsstromkreis keine unnötigen Umwege beinhalten und daher immer den kürzesten Verbindungsweg verfolgen. Um das spätere Bestücken der Bauteile und eine eventuelle Fehlersuche zu vereinfachen, wurden alle Baugruppen möglichst wie im Schaltplan eingezeichnet platziert. Die Klemmleisten befinden sich am Rand, die 844 µH Spule ist aufgrund der Größe sehr platzaufwendig und es musste ein genügend großer Freiraum eingeplant werden. Ein bedrahteter 1 mF Kondensator befindet sich am Eingang des Step-Up Converters, die beiden anderen beim Ausgang. Dazwischen mussten im Layout die Schottky-Diode und die beiden BUZ102-Transistoren so eingebaut werden, dass alle drei Teile im TO-220 Gehäuse an einem gemeinsamen Kühlkörper befestigt werden können.

Im nächsten Schritt wurde die Strom- und Spannungsmessung am Schaltungseingang eingeplant. Am wichtigsten und besonders aufwendig war dabei das richtige Design der Strommessung mit allen Widerständen und Kondensatoren rund um den IC MAX472. Ein 5 mΩ Messwiderstand wird im Stromkreis des Step-Up Converters eingebaut. Vom Messwiderstand führen zwei kurze und unbedingt gleichlange (!!) Leitungen über die Vorwiderstände direkt zu den Messeingängen des ICs. Weiters wichtig ist eine eigene dicke Verbindungsleitung vom Aufwärtswandler-Eingang zum IC, welche für den MAX472 als Versorgungsleitung benötigt wird. Aufzupassen ist bei der Position des Entkoppelkondensators an der Versorgungsleitung eines jeden ICs, dieser muss immer sehr nahe am Bauteil platziert werden. Da das Layout sowohl für den MAX472 (Strommessungen bis 10 A) als auch für den MAX471 (Strommessungen bis 3 A) ausgelegt wurde, befinden sich noch weitere Widerstände im Umfeld des IC, welche aber je nach Bauteilauswahl verschiedene Werte besitzen (teilweise 0 Ω-Widerstände oder manche Pads werden nicht bestückt). Das Design der Spannungsmesseinheit, mit den beiden Transistoren zum gezielten Ein- und Ausschalten der Messung, ist nicht so empfindlich. Daher wurde nur eine korrekte und Platz sparende Anordnung im Leiterplattenlayout angepeilt, wobei sich die beiden Transistoren in einem TO-92 Gehäuse befinden, bedrahtet sind und daher auf der Bauteilseite eingebaut werden.

Einbau des Mikroprozessors

Nun musste der Mikroprozessor PIC16F88 auf der Bauteilseite der Platine eingebaut werden. Es wurde darauf geachtet, den PIC eher zentral einzuplanen, um seine Anschlussleitungen in alle Richtungen weg verlegen zu können. Wichtigste Regel nach dem Einbau des PIC ist die sofortige nahe Anordnung des passenden Entkoppelkondensators. Außerdem musste noch je ein Entkoppelkondensator bei den richtigen Eingängen des PICs von den beiden Spannungsmessungen angebracht werden. Direkt neben dem PIC musste auch der 10 MHz Quarz mit seinen beiden 22 pF Kondensatoren Platz finden. Als letztes wurde neben dem PIC die

Betriebsleuchtdiode mit geeignetem Vorwiderstand eingebaut, danach konnten alle Anschlussleitungen vom PIC der Wichtigkeit nach verlegt werden.

Der Treiberbaustein TC4427A zur Ansteuerung der beiden BUZ102-Transistoren wurde möglichst nahe oberhalb des PIC platziert. Vom Mikroprozessor führen zwei Ausgangsleitungen zum TC4427A, welche beide PWM-Signale übertragen, das heißt die Leitungen sollen kurz und kreuzungsfrei verlegt werden. Zunächst mussten daher die PWM-Leitungen vom PIC zum Treiberbaustein und weiters direkt zu den beiden Transistoren des Typ BUZ102 verbunden werden. Weiters wurden die Ausgänge der Strom- und Spannungsmessungen zum Mikrokontroller gelegt. Dabei wurde der Bereich um die PWM-Leitungen gemieden, um die Störungen sehr gering zu halten. Es fehlt noch die Shutdown-Leitung zu den Messkomponenten für Ströme und Spannungen, außerdem müssen die Schnittstellen und die Spannungsregler auf der Leiterplatte eingeplant werden.

Dafür wurden zwei einstellbare Spannungsregler vom Typ LT1129 von Linear Technologies verwendet. Die Außenbeschaltung besteht aus zwei Kondensatoren und zwei Widerständen zur Spannungseinstellung, welche für 5 V und 12 V passende Werte besitzen müssen. Die Spannungsregler befinden sich in einem TO-220 Gehäuse mit 5 Anschlüssen und wurden im rechten unteren Eck der Leiterplatte rechts neben dem PIC eingebaut. Die Ausgangsleitungen sind möglichst dick zu allen Bauteilen verlegt worden, abschließend mussten noch die beiden Schnittstellen RS232 und ICD2 am unteren Rand der Platine platziert werden. ICD2 benötigt nur wenige Bauteile in der Nähe, bei RS232 wurde der Transceiver-Baustein DS275 neben der Schnittstelle eingeplant. Der Pegelkonverter-Chip braucht weiters nur einen Entkoppelkondensator, das heißt die restlichen Designanforderungen aufgrund der Schnittstellen sind nicht hoch und können bei der Layoutplanung zum Schluss erfüllt werden.

Probleme mit dem Autorouter

Der Entwurf des Leiterplattenlayouts erfolgte für das Projekt nach den bisher beschriebenen Arbeitsschritten, allerdings kann man beim Entwickeln des Layouts nicht mit der ersten Lösung die Fertigung beginnen. Durch die färbige Darstellung des Schaltplans am PC Bildschirm können manche Fehler schneller als auf Papier gefunden werden, wirkliche Probleme, wie zu dünne Leitungen oder Kurzschlüsse, kann man aber besser auf einem 1:1 Ausdruck erkennen. Das heißt nach dem Designentwurf erfolgt der erste Ausdruck auf Papier, um danach allgemeine Designfehler auf der Leiterplatte erkennen zu können. Im nächsten Schritt kann man dann relativ leicht Fehler, wie z.B. zu dünne Leitungen oder Durchkontaktierungen, korrigieren. Ein großes Problem an den ersten Layoutlösungen war vor allem die Verwendung des Autorouters von Eagle, da dieser keine Leitungsartenunterschiede kennt. Um ein gutes Layout mit einem Autorouter entwerfen zu können, müssten Einstellungen für alle Verbindungen einzeln getroffen werden, denn es muss beispielsweise zwischen PWM-Leitungen und Versorgungsleitungen bei der Bahndicke und Länge unterschieden werden. Der Eagle-Autorouter kann aber nicht so detaillierte Einstellungen verarbeiten, es sind nur Einstellungen zu Mindestbahndicke, Bahnabständen, Durchmesser von Durchkontaktierungen (Vias) und ähnlichem möglich. Spezifikationen für einzelne Leitungen sind in Eagle nicht einstellbar, dazu muss man auf professionellere Layoutsoftware zurückgreifen. Für die Realisierung des Maximum Power Point Tracker - Layout wurde daher letztendlich gar kein Eagle

Autorouter verwendet. Alle Leitungen wurden manuell nach den beschriebenen Voraussetzungen verlegt, die Leiterbahnen haben großteils eine Dicke von 0,04 inch = 1,016 mm, nur die Verbindungen von den Bauteilen weg in den SO-8 Gehäusen (MAX472, DS275) sind noch dünner mit 0,016 inch = 0,4064 mm. Durch die besonders dünnen Leitungen können Kurzschlüsse zwischen den Pins der kleinen Bauteile verhindert werden. Alle Verbindungen im Leistungsteil der Platine, dem Step-Up Converter, sind 0,15 inch = 3,81mm dick, um Strömen von bis zu 10 A mit relativ geringer Erwärmung standzuhalten. Bei der Verlegung von Masseleitungen (GND) ist darauf zu achten, dass nie GND-Anschlüsse der ICs direkt mit Masse des Leistungsteils verbunden werden. Dadurch könnten unbemerkt Kriechströme von den Leistungsbauteilen zu den ICs oder Mikrokontrollern fließen und so den Programmablauf stören oder elektrische Bauteile in unerlaubter Weise aktivieren. Dadurch könnte die komplette Schaltung und Regelung außer Kontrolle geraten und weitere Schäden verursachen.

Als Abschluss des Layouts werden GND-Flächen mit dem „Polygon“-Befehl in Eagle verlegt. Dazu muss man in der Befehlszeile „poly gnd“ eintippen und danach den gewünschten Bereich auf der Leiterplatte markieren. Die Fläche wird unter Einhaltung der eingestellten Design-Regeln (Leiterbahndicke, Abstände, …) durch Anklicken des „Ratsnest“-Befehl passend gezeichnet. Das heißt alle großen leeren Bereiche zwischen den Leiterbahnen werden zu Kupferflächen, welche mit Masse verbunden sind. Es musste ebenfalls darauf geachtet werden, dass nicht eine GND-Fläche vom Leistungsteil bis zu den ICs reicht. Am Layout wurden daher mehrere GND-Flächenbereiche für die Leistungsteile und die ICs separat erstellt und nur durch einzelne Verbindungen am GND-Sternpunkt am Eingangskondensator miteinander verbunden.

Nach der Verlegung aller Leiterbahnen und dem Erzeugen von brauchbaren GND-Flächen wird das Layout auf Papier gedruckt um nochmals Fehler im Review zu entdecken. Danach wurden mehrmals die Designentwürfe überarbeitet und optimiert um, beispielsweise Leitungslängen zu kürzen und die Dicke von Bahnen weiter zu erhöhen.

Anhang H:

Datenblätter

DS275 alles

MAX472 alles

BUZ102AL Seite:1-3

Schottky MBR1645 ??

LT1129-5 ADJ 1, 3, 9, 11

Steher S 32

Motor S 19 + 20

Scharnier & schraube S:144 + 148

Lager: beide

PIC 16F88

PIC16F88

PIC16F88

Wid

Wid

LT

LT

LT

LT

BUZ

BUZ

Schottky

Schottky

DS

DS

DS

DS

DS

MA

MA

MA

MA

MA

MA

Steher

Motor

Motor

Schanier

Halter

Lager 1

Lager2

Anhang I:

Programmlisting

Lüfteransteuerung Programmlisting

```
;==================================================================
; Name:    Testprogramm fuer PIC 16F88
; Datei:   Luefter090.ASM
; Description: LED PWM ADC
; Date:    16.12.2005
; Autor:   Klimpfinger - Grohs, Team Savonius, HTL3R
;===================================================================
   list     p=16f88
   #include <p16f88.inc>
   org      0x000
   goto     init
   org      0x005
init
   movlw    b'00000000'        ; init PORTA
   movwf    PORTA
   movlw    b'00000000'        ; init PORTB
   movwf    PORTB

   bsf      STATUS,RP0         ; switch to bank1
   movlw    b'01000001'        ; define Inputs and Outputs
   movwf    TRISA
   movlw    b'00000000'        ; Output für PWM
   movwf TRISB
;OSC Init
   movlw    b'0100010'         ; OSC Set 250kHz
   movwf    OSCCON             ; ....
;PWM Init
   movlw    b'11111111'
   movwf    PR2                ; Periode 256 Teile Fosc/4 = 4ms
   bcf      STATUS,RP0         ; bank0
   movlw    b'00001100'        ; CPP auf PWM
   movwf    CCP1CON
   movlw    b'00000100'        ; Timer2 enable
```

```
   movwf   T2CON
;ADC Init
   bsf STATUS,RP0               ; switch to bank1
   movlw b'00000001'            ; select RA0 as an Analog input
   movwf ANSEL
   movlw b'01000000'            ;Result: left justified
   movwf ADCON1                 ; Voltage reference VDD and VSS
   bcf STATUS,RP0               ; switch to bank0
   movlw b'00000001'            ; Select PIN RA0 and set ADC ready
   movwf ADCON0
main
;adc
   bsf ADCON0,GO_DONE           ; Starts A/D conversion
   nop
ADC
   nop
   btfsc   ADCON0,GO_DONE       ; wait for A/D conversion result
   goto    ADC
   movf    ADRESH,W             ; read ADC result
   addlw   .25                  ; add 25 to ADC result in Wreg
           ; if Wreg + 25 is > 255 --> signal higher than 90%
           ; if Wreg > 255 --> Carrybit is set
           ; else the normal ADC result is written to CCPR1L
   btfsc   STATUS,C             ; read Carrybit Overflow=1
   goto    over                 ; goto over(load) subroutine
   movf    ADRESH,W             ;write original ADC result back to Wreg
   movwf   CCPR1L               ; write Wreg to PWM Duty cycle
   goto    main

over                            ;Write Maximum of 230 = 90%
   movlw   .230                 ; write maximum of 230 to Wreg
   movwf   CCPR1L               ; write Wreg to PWM Duty cycle
   goto    main
   end
```

Maximum Power Point Tracker Programmlisting

```
;********************************************************************
;                                                                   *
;    Filename:       16F88_MPPT_2_12.asm                            *
;    Date:           28 April 2006                                  *
;    File Version:   2.4                                            *
;                                                                   *
;    Author:         Klimpfinger Koloman, Grohs Daniel              *
;    Company:        Team Savonius                                  *
;                                                                   *
;********************************************************************
     list      p=16f88     ;list directive to define processor
     #include <p16F88.inc> ;processor specific variable definitions
     errorlevel  -302      ;suppress message 302 from list file
;***** VARIABLE DEFINITIONS
Carry      EQU   C
Zero       EQU   Z
RB1        EQU   0x01
RB4        EQU   0x04
Same       EQU   1
ccp_flag   EQU   0         ;flag define to increase/decrease the DC
dcd_flag   EQU   1
usart_flag EQU   2         ;flag define to transmit the data or not
channel    EQU   0x21      ;variable used for Analog-channel select
mikro      EQU   0x22      ;variable for Delay-loops
mikro_2    EQU   0x23      ;variable for Delay-loops
marker     EQU   0x24      ;flag-Reg for changing direction of DC
CCP_temp   EQU   0x25      ;variable used for changing DC
toggler    EQU   0x26      ;Register for inverting ccp_flag
marker_usart     EQU   0x28 ;Flag-Register for USART-Transmission
Uin        EQU   0x30      ;voltage input
Iin        EQU   0x31      ;current input
Uout       EQU   0x32      ;voltage output
Iout       EQU   0x33      ;current output
```

```
P0_H        EQU   0x34        ;High byte of the old result
P0_L        EQU   0x35        ;Low byte of the old result
mulcnd      EQU   0x36        ;8 bit multiplicand
mulplr      EQU   0x37        ;8 bit multiplier
H_byte      EQU   0x38        ;High byte of the 16 bit result
L_byte      EQU   0x39        ;Low byte of the 16 bit result

peak_voltage    EQU   0x42 ;the maximum value of charging voltage
peak_current    EQU   0x43 ;the maximum value of current load
delayer     EQU   0x55        ;Reg for program passes before DC-chancing
rs232_1     EQU   0x74        ;temporary RS232 Register
rs232_2     EQU   0x75        ;temporary RS232 Register
;*****************************************************
     ORG      0x000                    ;processor reset vector
     GOTO     Init                     ;go to beginning of program
;******** Delay Schleife *****************************
delay_mks
   BCF      STATUS,RP0        ;select Bank 0
   BCF      STATUS,RP1        ;select Bank 0
   MOVWF    mikro
delay1
   MOVLW    .255
   MOVWF    mikro_2
delay2
   NOP
   NOP
   DECFSZ   mikro_2,1
   GOTO     delay2
   NOP
   NOP
   DECFSZ   mikro,1
   GOTO     delay1
   NOP
   RETURN
```

```
;***** Analog Digital Wandlung *****************************
ADC
    BCF      STATUS,RP0          ;select Bank 0
    BCF      STATUS,RP1          ;select Bank 0
    MOVWF    channel             ;use channel-register
    BCF      STATUS,Carry        ;rotate on the right place
    RLF      channel,1           ;to select the channel for
    BCF      STATUS,Carry        ;the Analog Digital conversation
    RLF      channel,1
    BCF      STATUS,Carry
    RLF      channel,1
    MOVLW    b'11000111'         ;clear channel select bits
    ANDWF    ADCON0,1
    MOVF     channel,W           ;Select the channel with
    IORWF    ADCON0,1            ;the prepared channel-register
    nop
    nop
    MOVLW    .10                 ;wait acquisition time
    CALL     delay_mks
    BCF      STATUS,RP0          ;select Bank 0
    BCF      STATUS,RP1          ;select Bank 0
    BSF      ADCON0,GO           ;starts conversation
ADC2
    BCF      STATUS,RP0          ;select Bank 0
    BCF      STATUS,RP1          ;select Bank 0
    BTFSS    ADCON0,GO           ;wait for end of conversation
    GOTO     ADC3
    GOTO     ADC2
ADC3
    BCF      STATUS,RP1          ;select Bank 0
    BCF      STATUS,RP0          ;select Bank 0
    MOVF     ADRESH,W            ;saves AD-result to working-register
    RETURN
```

```
;******* Voltage Limit ************************************
limit_voltage
   NOP                          ;compares the output voltage
                                ; and the allowed maximum voltage
   BCF      STATUS,C            ;clears the Carry Bit
   MOVF     Uout,W
   SUBWF    peak_voltage,W             ;W = peak_voltage - Uout
   BTFSS    STATUS,C                   ;if Uout is bigger skip next op
   GOTO     too_high_v
   GOTO     past_schon_v
too_high_v                      ;if output Voltage is too high
   NOP                          ;
   MOVLW    0x00                ;the duty cycle of the PWM is shut down
   MOVWF    CCPR1L
   BSF      PORTB,RB4           ; and the break resistor is activated
   GOTO     main
past_schon_v                    ;if the output voltage is ok
   BCF      PORTB,RB4           ; the break resistor is deactivated
   NOP
   RETURN

;******* current Limit ************************************
limit_current
   NOP
   BCF      STATUS,C            ;clears the Carry Bit
   MOVF     Iin,W
   SUBWF    peak_current,W      ;W = peak_current - Iin
   BTFSS    STATUS,C            ;if Iin is bigger skip next op
   GOTO     too_high_c
   GOTO     past_schon_c
too_high_c                      ;if input current is too high
   NOP                          ;it had to be decreased
   BCF      STATUS,C            ;clears the Carry Bit
   MOVFW    CCPR1L
```

```
   MOVWF    CCP_temp
   MOVFW    CCP_temp              ;test for overflow
   SUBLW    .2                    ;0 -> 255
   BTFSC    STATUS,C
   goto     wweiter
   DECF     CCPR1L,f              ;decrease Duty cycle
   DECF     CCPR1L,f              ;decrease Duty cycle
   GOTO     past_schon_c
past_schon_c
   NOP
   RETURN

;******** USART Transmition Test *********************************
USART
   NOP
   BTFSC    marker_usart,usart_flag    ;test flag for operation
   GOTO     send_usart
   GOTO     rec_test

send_usart                        ;transmit the measured values
   NOP
   BCF      STATUS,RP0            ;select Bank 0
   BCF      STATUS,RP1            ;select Bank 0
   MOVLW    .255                  ;transmits reference Sign
   CALL     RS232
   MOVFW    Uin                   ;transmits Input Voltage Uin
   CALL     RS232
   MOVFW    Iin                   ;transmits Input Current Iin
   CALL     RS232
   MOVFW    Uout                  ;transmits Output Voltage Uout
   CALL     RS232
   MOVFW    Iout                  ;transmits Output Current Iout
   CALL     RS232
   BTFSS    PIR1,RCIF             ;test if sign was received
```

```
   GOTO     USART_end
   BCF      marker_usart,usart_flag    ;clear the usart_flag bit
   MOVFW    RCREG                      ; and clear the RCIF bit
   GOTO     USART_end
rec_test
   NOP
   BCF      STATUS,RP0          ;select Bank 0
   BCF      STATUS,RP1          ;select Bank 0
   BTFSS    PIR1,RCIF           ;test if sign was received
   GOTO     USART_end
   BSF      marker_usart,usart_flag    ;set the usart_flag bit
   MOVFW    RCREG                      ; and clear the RCIF bit
   GOTO     USART_end
USART_end
   RETURN

;******** RS232 Uebertragung  ***********************************
RS232
   MOVWF    rs232_1
   SWAPF    rs232_1, w          ;swap the byte
   MOVWF    rs232_2             ;save in rs232_2
   ANDLW    0x0f                ;mask out first nibble
   CALL     ASCIITAB            ;call ASCIITAB
   BTFSS    PIR1,4              ;test if all bits were sent
   GOTO     $-1
   MOVWF    TXREG               ;move Working to Transmit register
   NOP
   MOVF     rs232_1, w          ;move result to Working
   ANDLW    0x0f                ;mask out first nibble
   CALL     ASCIITAB            ;call ASCIITAB
   BTFSS    PIR1,4              ;test if all bits were sent
   GOTO     $-1
   MOVWF    TXREG               ;move Working to Transmit Register
   NOP
```

```
   MOVLW   0Dh                 ;ASCII-Sign 'line feed'
   BTFSS   PIR1,4              ;test if all bits were sent
   GOTO    $-1
   MOVWF   TXREG               ;move Working to Transmit Register
   NOP
   MOVLW   0Ah                 ;ASCII-Sign 'carriage return'
   BTFSS   PIR1,4              ;test if all bits were sent
   GOTO    $-1
   MOVWF   TXREG               ;move Working to Transmit Register
   GOTO    send_stopp
ASCIITAB
   ADDWF   PCL, f              ;PCL=Program Counter LSB
   RETLW   '0'
   RETLW   '1'
   RETLW   '2'
   RETLW   '3'
   RETLW   '4'
   RETLW   '5'
   RETLW   '6'
   RETLW   '7'
   RETLW   '8'
   RETLW   '9'
   RETLW   'A'
   RETLW   'B'
   RETLW   'C'
   RETLW   'D'
   RETLW   'E'
   RETLW   'F'
send_stopp
   RETURN
;********   Define a macro for adding & right shifting  **
mult    MACRO   bit             ;Begin macro
        BTFSC   mulplr,bit
        ADDWF   H_byte,Same
```

```
        RRF      H_byte,Same
        RRF      L_byte,Same
        ENDM                    ;End of macro

;********   Multiplier Routine  *********************
multiply
   CLRF    H_byte
   CLRF    L_byte
   MOVF    mulcnd,W            ;move the multiplicand to W reg.
   BCF     STATUS,C            ;clear the Carry bit in the STATUS Reg.
   mult    0
   mult    1
   mult    2
   mult    3
   mult    4
   mult    5
   mult    6
   mult    7

   RETLW   0

;******** compare *****************************
compare
   NOP
   BCF     STATUS,RP0          ;select Bank 0
   BCF     STATUS,RP1          ;select Bank 0
   MOVFW   P0_H
   SUBWF   H_byte,W            ;W = H_byte - P0_H
                               ;Warning! Subtraction! C-Bit -> B-Bit
                               ; inverse Logic
   BTFSS   STATUS,C            ;if H_byte is bigger skip next op
   GOTO    DC_change
   BTFSS   STATUS,Z            ;test if H_byte = P0_H
                               ; and skip next if it is
```

```
   GOTO     past_so
   MOVFW    P0_L
   SUBWF    L_byte,W              ;W = L_byte - P0_L
   BTFSS    STATUS,C              ;if L_byte is bigger skip next op
   GOTO     DC_change
   BTFSS    STATUS,Z              ;test if L_byte = P0_L
                                  ; and skip next if it is
   GOTO     past_so
   GOTO     DC_gar
DC_change
   MOVFW    toggler               ;toggles the bit that defines
   XORWF    marker,f              ; the change of the duty cycle
   BSF      marker,dcd_flag
   GOTO     comp_end              ;because power was decreased
past_so                           ;direction is not changed because
   nop                            ;the power was increased
   BSF      marker,dcd_flag
   GOTO     comp_end
DC_gar                            ;nothing is changed because
   nop                            ;this is the Maximum Power Point
   BCF      marker,dcd_flag
   GOTO     comp_end
comp_end
   MOVFW    H_byte                ;save High register of power result
   MOVWF    P0_H
   MOVFW    L_byte                ;save LOW register of power result
   MOVWF    P0_L
   NOP
   RETURN

;*** chnge_DC ****************************
change_DC
   BTFSS    marker,dcd_flag
   GOTO     wweiter
```

```
   BTFSS    marker,ccp_flag     ;test flag for operation
   GOTO     increase
   GOTO     decrease
increase                        ;increase duty cycle
   NOP
   BCF      STATUS,C            ;clears the Carry bit
   MOVFW    CCPR1L
   MOVWF    CCP_temp
   INCF     CCP_temp,f
   INCF     CCP_temp,f
   MOVFW    CCP_temp            ;test for overflow/too high duty cycle
   ADDLW    .201
   BTFSC    STATUS,C
   GOTO     wweiter
   INCF     CCPR1L,f            ;increase duty cycle
   INCF     CCPR1L,f            ;increase duty cycle
   GOTO     wweiter
decrease                        ;decrease duty cycle
   NOP
   BCF      STATUS,C            ;clears the Carry bit
   MOVFW    CCPR1L
   MOVWF    CCP_temp
   MOVFW    CCP_temp            ;test for overflow
   SUBLW    .1                  ;0 -> 255
   BTFSC    STATUS,C
   GOTO     wweiter
   DECF     CCPR1L,f            ;decrease duty cycle
   GOTO     wweiter
wweiter
   RETURN
;***** Initialisierun ******************************
Init
   BCF      STATUS,RP0          ;select Bank 0
   BCF      STATUS,RP1          ;select Bank 0
```

```
    MOVLW    b'00000000'          ;clear PortA
    MOVWF    PORTA
    MOVLW    b'00000000'          ;clear PortB
    MOVWF    PORTB
    BSF      STATUS,RP0           ;select Bank 1
    BCF      STATUS,RP1           ;select Bank 1
    MOVLW    b'00000100'          ;set RX-Pin as input
    MOVWF    TRISB
    MOVLW    b'00001111'          ;set measuring-Pins on PortA as input
    MOVWF    TRISA
;** Oscillator
    BSF      STATUS,RP0           ;select Bank 1
    BCF      STATUS,RP1           ;select Bank 1
    MOVLW    b'01100000'          ;use External Oscillator 10 MHz [HS]
    MOVWF    OSCCON
;** Init USART
    BSF      STATUS,RP0           ;select Bank 1
    MOVLW    D'64'                ;Decimals 64 to configure Baudrate
    MOVWF    SPBRG                ;for 9.6k(Highspeed)
    MOVLW    b'00100110'          ;set Transmit enable and High Baudrate Sel-Bit
    MOVWF    TXSTA                ;in Transmit Status and Control Register
    BCF      STATUS,RP0           ;select Bank 0
    MOVLW    b'10010000'          ;enables serial port and receive
    MOVWF    RCSTA
    MOVFW    RCREG                ;clear RCIF
;** ADC Init
    BSF      STATUS,RP0           ;select Bank 1
    MOVLW    b'00001111'          ;select RA0 as an Analog input
    MOVWF    ANSEL
    MOVLW    b'01000000'          ;Result: left justified (8bit)
    MOVWF    ADCON1               ;voltage reference VDD and VSS
    BCF      STATUS,RP0           ;select Bank 0
    MOVLW    b'01000001'          ;select PIN RA0 and
    MOVWF    ADCON0               ;set ADC ready and Fosc/16
```

```
;** PWM und Interrupts
    BSF     STATUS,RP0          ;select Bank 1
    BCF     STATUS,RP1          ;select Bank 1
    MOVLW   0x3F                ;set PWM Periode
    MOVWF   PR2
    BCF     STATUS,RP0          ;select Bank 0
    BCF     STATUS,RP1          ;select Bank 0
    MOVLW   0x2D                ;Duty Cycle starting value
    MOVWF   CCPR1L
    MOVLW   b'01111100'         ;TMR2 on
    MOVWF   T2CON
    MOVLW   .12                 ;configure CCP as PWM
    MOVWF   CCP1CON
    BSF     STATUS,RP0          ;select Bank 1
    BCF     STATUS,RP1          ;select Bank 1

;** Init special register
    BCF     STATUS,RP0          ;select Bank 0
    BCF     STATUS,RP1          ;select Bank 0

    MOVLW   .4                  ;load delayer with 4 for delay
    MOVWF   delayer
    MOVLW   0xE6                ;maximum charge Voltage
    MOVWF   peak_voltage        ; (0xE6 -> 24V-Akku / 0x73 -> 12V-Akku)
    MOVLW   0x22                ;maximum current
    MOVWF   peak_current        ; (0x3C = 2,5A / 0X1B = 1A) 0X28
    MOVLW   b'00000001'         ;set BIT for toggling flags
    MOVWF   toggler
    MOVLW   b'00000010'         ;clear flag-bit of PWM DC
    MOVWF   marker
    MOVLW   b'00000000'         ;clear flag-bit of USART
    MOVWF   marker_usart

    MOVLW   .0                  ;start value for least Power value
```

```
   MOVWF    P0_H                ;used to compare at first time
   MOVLW    .0
   MOVWF    P0_L

   MOVLW    .1                  ;start value for actual Power
   MOVWF    H_byte              ;used to compare at first time
   MOVLW    .1
   MOVWF    L_byte

   MOVLW    .0                  ;initialisation of the
   MOVWF    mulplr              ;multiplication registers
   MOVLW    .0                  ;initialised with zero
   MOVWF    mulcnd

; ******* Main Program ******************************************
main
   BCF      STATUS,RP0          ;select Bank 0
   BCF      STATUS,RP1          ;select Bank 0
   BCF      PORTA,4             ;activates Status-LED

   BSF      PORTB,1             ;activates measuring ICs

   MOVLW    .0                  ;value for ADC-Channel select
   CALL     ADC                 ;calls ADC - routine
   MOVWF    Uin                 ;store result in Uin-Register

   MOVLW    .1                  ;value for ADC-Channel select
   CALL     ADC                 ;calls ADC - routine
   MOVWF    Iin                 ;store result in Iin-Register

   MOVLW    .2                  ;value for ADC-Channel select
   CALL     ADC                 ;calls ADC - routine
   MOVWF    Uout                ;store result in Uout-Register
   MOVWF    mulcnd              ;store result in multiplicand-Register
```

```
MOVLW   .3                  ;value for ADC-Channel select
CALL    ADC                 ;calls ADC - routine
MOVWF   Iout                ;store result in Iout-Register
MOVWF   mulplr              ;store result in multiplier-Register

BCF     PORTB,1             ;deactivates measuring ICs

CALL    USART               ;calls subroutine for RS232

CALL    limit_voltage       ;test maximum charging voltage
CALL    limit_current       ;test maximum input current

DECF    delayer
BTFSS   STATUS,Z            ;test for fifth pass
GOTO    main
MOVLW   .4
MOVWF   delayer

CALL    multiply            ;calls multiplication-routine
CALL    compare             ;calls compare-routine
CALL    change_DC
GOTO    main
END
```

Anhang J:

Sponsoren

Für Unterstützung in den Bereichen Finanzierung, Material und auch Know-How bedanken wir uns besonders bei unseren Sponsoren.

Förderanlagen – Schlosserei WERFRING Ges.m.b.H.



Schlosserstraße 4

7221 Marz

www.werfring.net

RÖMERQUELLE Ges.m.b.H.



Holzmanngasse 3

A-1211 Wien

www.roemmerquelle.at

RS Components Handelsges.m.b.H



Albrechtser Straße 11

3950 Gmünd

www.rs-components.at

Conrad Electronic GmbH & Co.KG



Durisolstraße 2

4600 Wels

www.conrad.at